



HELSINGIN YLIOPISTO
MAATALOUS-METSÄTIEEELLINEN TIEDEKUNTA

Kaistalehakkuun tuottavuus ja puustovauriot ojitettujen rämemänniköiden puunkorjuussa

Markus Toikka
Maisterin tutkielma
Helsingin yliopisto
Metsätieteiden maisteriohjelma
Metsien ekologia ja käyttö
Helmikuu 2021

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos/Institution– Department Metsätieteiden osasto, metsätieteiden maisteriohjelma	
Tekijä/Författare – Author Markus Toikka			
Työn nimi / Arbetets titel – Title Kaistalehakkuun tuottavuus ja puustovauriot ojitettujen rämemänniköiden puunkorjuussa			
Oppiaine /Läroämne – Subject Metsien ekologia ja käyttö			
Työn laji/Arbetets art – Level Maisterin tutkielma		Aika/Datum – Month and year Helmikuu 2021	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 65 s.
<p>Tiivistelmä/Referat – Abstract</p> <p>Suomen puuntuotannon metsämaasta noin neljännes on turvemailla sijaitsevia suomensia. 1960- ja 1970-lukujen laajan ojitustoiminnan aikaansaaman puuston kasvunlisäyksen seurauksena ojitetut suomensat alkavat enenevässä määrin olla 2020-luvulla puustoltaan metsätaloudellisesti uudistuskypsiä. Suomalaisessa tasaikäismetsätaloudessa uudistuskypsi metsien osalta yleisesti hyödynnettyjen toimenpiteiden, kuten avohakkuiden, maanmuokkausten ja kunnostusojitusten on kuitenkin todettu aiheuttavan negatiivisia ilmasto- ja vesistövaikutuksia turvemailla. Turvemaiden metsätaloudellisen käytön yhteiskunnallisen hyväksyttävyyden varmistamiseksi tarve vaihtoehtojen metsänkasvatusmenetelmien aktiiviselle tutkimus- ja kehitystyölle on korostunut viime aikoina. Kaistalehakkuumenetelmää on osittain kaavailtu mäntyvaltaisilla räme-kohteille avohakkuun korvaajaksi. Kaistalehakkuumenetelmällä tarkoitetaan hakkuumenetelmää, jossa hakkuukohteelle sijoitetaan kaistaleita, jotka hakataan aukeaksi ja vastaavasti väliin jätetään puustoisia kaistaleita kasvamaan ja siementämään avoimeksi hakattuja alueita. Turvemailla kaistalehakkuumenetelmä mahdollistaa vähäisemmän turpeen vedenpinnan tason nousun kuin koko kohteen kattavassa avohakkuussa ja tästä syystä menetelmän ilmasto- ja vesistövaikutusten on ennakoitu olevan maltillisempia kuin avohakkuussa.</p> <p>Tämän tutkimuksen tavoite oli tuottaa tietoa turvemaalla toteutettavan kaistalehakkuun korjuuteknisestä toteutuksesta. Tutkimuksessa selvitettiin mäntyvaltaisilla räme-kohteilla kaistaleen leveyden vaikutusta hakkuutyön tuottavuuteen sekä tarkasteltiin kaistalehakkuun seurauksena syntyvien puustovaurioiden määrää hakkuukaistaleiden viereen jäävillä puustokaistaleilla. Hakkuutyön ajanmenekki- ja tuottavuustaserojen selvittämiseksi kaistalehakkuumenetelmää tarkasteltiin kolmella eri kaistaleen leveydellä, jotka olivat 10 m, 20 m ja 30 m. 10 ja 20 metriä leveät kaistaleet hakattiin yhdeltä uralta ja 30 metriä leveä kaistale kahdelta 15 metriä leveältä käsittelykaistaleelta. Tutkimusaineisto kerättiin loka- ja marraskuussa 2020 kahdelta räme-kohteelta hyödyntäen videointityökaluja ja hakkuukonedataa. Kaistalehakkuuta tarkasteltiin kolmen kokeneen hakkuukoneenkuljettajan työskentelyn perusteella. Aikatutkimusaineiston koko oli yhteensä 3562 runkoa ja yli 30 tuntia videoitua kaistalehakkuutyöskentelyä. Kaistalehakkuun ajanmenekkiä tarkasteltiin työvaihekohtaisen kelloaikatutkimuksen periaatteita hyödyntäen.</p> <p>Tulosten perusteella käsittelyleveydellä ei ollut suurta vaikutusta hakkuutyön ajanmenekkiin ja tuottavuustasoon. 15 metriä leveällä käsittelykaistaleella hakkuutyön tehontuottavuuden todettiin olevan 1 % suurempi kuin 20 metriä leveällä kaistaleella ja 3 % suurempi kuin 10 metriä leveällä kaistaleella käsiteltävän rungon koon ollessa sama. Yksittäisistä työvaiheista siirtyminen ja hakkuulaitteen vienti kaadettavalle rungolle olivat työvaiheita, joiden ajanmenekki selkeimmin erosi käsittelyleveyksien välillä. Kaistalehakkuun keskimääräinen tehontuottavuus oli eri käsittelyleveyksillä 39,8–41,0 m³/h käsiteltävän rungon koon ollessa 365 dm³. Tulosten perusteella puustovaurioiden määrä oli vähäinen kaistalehakkuussa. Kaistalehakkuun seurauksena vaurioituneiksi todettiin vain 2,6 % kuuden metrin etäisyydellä hakkuukaistaleen reunasta sijainneista vieruspuista. Puustovauriokoealoilta lasketun runkoluvun perusteella tämä on noin 12 vaurioitunutta runkoa hehtaarilla.</p> <p>Tämän tutkimuksen tulosten perusteella kaistalehakkuumenetelmä on hakkuutyön tuottavuustason ja vähäisen puustovaurioriskin perusteella erittäin varteenotettava menetelmä mäntyvaltaisilla räme-kohteilla. Turvemaalla toteutettavan kaistalehakkuun osalta aikaisempia tutkimuksia on todella vähän ja siihen tietotarpeeseen tämä tutkimus tuo lisäystä. Kaistalehakkuumenetelmä tulee mitä todennäköisimmin yleistymään tulevaisuudessa ojitettujen suomensien hakkuumenetelmänä, varsinkin jos sitä hyödyntämällä suomensien käytön negatiivisia ilmasto- ja vesistövaikutuksia saadaan vähennettyä.</p>			
<p>Avainsanat – Nyckelord – Keywords Kaistalehakkuu, hakkuutyö, aikatutkimus, tuottavuus, puustovauriot, räme, mänty</p>			
<p>Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helsingin yliopiston kirjasto – Helda / E-thesis (opinnäytteet) ethesis.helsinki.fi</p>			
<p>Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information ja oppiaineissa.</p> <p>Ohjaajat: Jori Uusitalo, Heikki Korpunen, Veli-Pekka Kivinen</p>			

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos/Institution– Department Department of Forest Sciences
Tekijä/Författare – Author Markus Toikka		
Työn nimi / Arbetets titel – Title Cutting productivity and tree damages in strip cutting of Scots pine-dominated peatland forest		
Oppiaine /Läroämne – Subject Forest ecology and management		
Työn laji/Arbetets art – Level Master's thesis	Aika/Datum – Month and year February 2021	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 65 p.
<p>Tiivistelmä/Referat – Abstract</p> <p>About a quarter of the productive forest land in Finland is located in peatlands. Extensive drainage activities in the 1960s and 1970s have led to that peatlands drained for forestry will increasingly be regeneration-ready in the 2020s. Even-aged management is the most common way to manage forests in Finland. Commonly used methods in even-aged management, such as clear cutting, tillage and ditch network maintenance have been found to cause negative greenhouse gas emissions and water quality impacts in peatland forests. Because of the negative environmental impacts, alternative forest management methods has been emphasized recently. Strip felling method is partly planned to replace the extensive clear cuttings of Scots pine-dominated peatland forests. In strip felling method narrow strips are placed on the felling site, so that part of the area is canopy-covered all the time. By utilizing strip felling method it is possible to stabilize the ground water level of the peatland and reduce the negative greenhouse gas emissions and water quality impacts.</p> <p>The objective of this study was to investigate the implementation of harvester work in strip felling method. The effect of strip width to the productivity of cutting work was studied and tree damages were measured after strip cutting operations. To determine the differences in time consumption and productivity in harvesting work, strip felling method was examined with three different strip widths: 10 m, 20 m and 30 m. 10 and 20 m wide strips were cut from one groove and 30 m wide strip from two 15 m wide strips. This empirical time study was conducted in October and November 2020 by using video recording tools and harvester data. Three experienced harvester drivers were included in the study. Time study data consisted of 3 562 stems and more than 30 hours of videotaped cutting work.</p> <p>The results revealed that the strip width did not have a large effect on the time consumption and the productivity of the cutting work. By utilizing 15-meter-wide strip, the actual effective productivity of cutting work was 1% higher than in 20-meter-wide strip and 3% higher than in 10-meter-wide strip. Moving and positioning-to-cut were individual work phases, which clearly differed between the working widths. The average effective productivity of strip felling at different strip widths varied between 39.8–41.0 m³/h with the stem size of 365 dm³. Based on the results, the amount of damages in remaining trees were low after the strip cutting. Only 2.6% of the trees at a distance of six meters from the edge of the felling strip were found to be damaged.</p> <p>Based on the results of this study, strip cutting is a potential method for management of Scots pine-dominated peatland forests. Strip cutting method enables high productivity of cutting work and low risk of tree damages. There are only few previous studies focusing on strip cutting method and therefore this study expands the understanding of strip cutting implementation. Strip felling will be more utilized method in ditched peatlands in the future, especially if the use of it enables reduction of the negative environmental impacts.</p>		
<p>Avainsanat – Nyckelord – Keywords Strip cutting, time study, productivity, tree damages, peatland, pine</p>		
<p>Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helsinki university library – Helda / E-thesis ethesis.helsinki.fi</p>		
<p>Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information Supervisors: Jori Uusitalo, Heikki Korpunen, Veli-Pekka Kivinen</p>		

ALKUSANAT

Tämä Pro gradu -tutkielma toteutettiin osana Luonnonvarakeskuksen SuoPPP-tutkimushanketta. Hankkeen tarkoituksena oli kehittää ratkaisuja turvemaiden kestävän metsänhoidon taloudellisiin ja ekologisiin ongelmiin tuottamalla käytännön toimijoille tutkimukseen perustuvaa tietoa. Tutkimusprojektin osarahoittajia ja yhteistyökumppaneita olivat Metsä Group, Metsähallitus, MTK, Tornator, UPM ja Green Carbon. Pro gradu -tutkielman osalta tavoitteena oli tarkastella kaistalehakkuumenetelmän hyödyntämistä turvemaiden puunkorjuussa. Mielenkiintoisesta ja opettavaisesta tutkimusaiheesta kiitän Helsingin yliopiston metsäteknologian ja puunhankinnan logistiikan professoria Jori Uusitaloa, joka projektin alkaessa työskenteli vielä Luonnonvarakeskuksella. Tutkimuskonaisuuden järjestelyistä ja maastotöiden onnistumisesta erityinen kiitos kuuluu Luonnonvarakeskuksen Paula Jylhälle, Jari Ala-Ilomäelle, Heikki Korpuselle ja Harri Lindemanille. Kiitos kuuluu myös Helsingin yliopiston metsäteknologian lehtorille Veli-Pekka Kiviselle sekä kaikille muille tämän tutkimuksen toteutukseen myötävaikuttaneille.

Helsingissä helmikuussa 2021

Markus Toikka

Sisällysluettelo

1 JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Kaistalehakkuumenetelmä	5
1.2.1 Kaistalehakkuumenetelmän periaate	5
1.2.2 Kaistalehakkuu puunkorjuun näkökulmasta	8
1.3 Hakkuutyön aika- ja tuottavuustutkimus	10
1.3.1 Koneellisen hakkuutyön aika- ja tuottavuustutkimusten tausta	10
1.3.2 Hakkuutyön tarkastelutasot ja työvaiheet.....	11
1.3.3 Hakkuutyön tuottavuuteen vaikuttavat tekijät.....	13
1.4 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset	14
2 AINEISTO JA MENETELMÄT	16
2.1 Kaistalehakkuuleimikot, kuljettajat ja kalusto.....	16
2.2 Koealajärjestelyt tutkimusleimikoissa	18
2.3 Aineiston kerääminen tutkimusleimikoilta	19
2.4 Puustovaurioiden määrittäminen.....	20
2.5 Aineiston käsittely ja analysointi	21
2.5.1 Kaistalehakkuun työvaihejaottelu	21
2.5.2 Aikatutkimusaineiston analysointi	23
2.5.3 Tehoajanmenekin ja tehotuntituottavuuden laskenta	25
2.5.4 Kaistalehakkuun työtekniikan määrittäminen	27
3 TULOKSET	29
3.1 Kaistalehakkuun työvaiheet.....	29
3.1.1 Siirtyminen	29
3.1.2 Hakkuulaitteen vienti puulle	30
3.1.3 Kaato ja tuonti	31
3.1.4 Prosessointi.....	33
3.1.5 Hakkuulaitteen tai latvan tuonti eteen	34
3.1.6 Raivaus ja apuajat.....	35
3.2 Kaistalehakkuun tehoajanmenekki ja tehotuntituottavuus	35
3.3 Työtekniikka kaistalehakkuussa	39
3.4 Puustovauriot kaistalehakkuussa	42

4 TULOSTEN TARKASTELU.....	45
4.1 Aika- ja tuottavuustutkimus.....	45
4.1.1 Aikatutkimusaineisto.....	45
4.1.2 Käytetyt menetelmät.....	46
4.1.3 Käsittelyleveyden vaikutus kaistalehakkuun ajanmenekkiin	48
4.1.4 Kaistalehakkuun tuottavuustaso	51
4.2 Kaistalehakkuun työtekniikka.....	53
4.3 Puustovauriot kaistalehakkuussa	55
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	58
LÄHTEET.....	61

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Suomessa on 26,2 miljoonaa hehtaaria metsätalousmaata, mikä on noin 86 % koko Suomen maapinta-alasta. Valtakunnan metsien inventoinnin (VMI12) mukaan metsätalousmaasta arviolta kolmasosa, eli noin 8,8 miljoonaa hehtaaria on soita. Valtakunnan metsien inventoinnissa suoksi luokitellaan alueet, joilla kivennäismaata peittää turvekerros tai suokasvillisuuden osuus on yli 75 % (Hökkä ym. 2002). Suomen suopinta-alasta yli puolet on ojitettu (Korhonen ym. 2017). Soiden ojittamisen päätarkoituksena on ollut laskea turpeen vedenpinnan tasoa ja näin parantaa turvemaiden vesitaloutta puuston kasvun lisäämiseksi. Laajamittainen soiden ojitus 1960- ja 1970-luvuilla on johtanut siihen, että puuston kasvu suometsissä on lähes kolminkertaistunut ojitusta edeltäneeseen lähtötilanteeseen verrattuna ja nykyään noin neljännes Suomen metsien kasvusta sekä puuston määrästä on suometsissä (Korhonen ym. 2017). Paikoitellen turvemaiden osuus metsäpinta-alasta ja puuston kasvusta on vielä huomattavasti merkittävämpi, esimerkiksi Pohjois-Pohjanmaalla ojitettujen soiden osuus puuntuotannon metsämaasta on jopa yli 40 % (VMI12). Metsäteollisuuden nykyisten tuotantolaitosten sekä uusien investointien puunkannan kannalta ojitetut suometsät ovat puuston kasvunlisäyksen myötä paikoitellen entistä keskeisemmässä asemassa (Hiltunen & Palander 2020). Suometsien merkittävän puuvarannon metsätaloudelliseen käyttöön liittyy kuitenkin useita ongelmia, jotka eroavat kivennäismailla sijaitsevista metsistä. Keskeisimmät suometsien käyttöä koskevat ongelmat liittyvät puunkorjuun toteutukseen sekä metsänkäsittelymenetelmien ilmasto- ja vesistövaikutuksiin.

Puunkorjuun toteutusta ja kannattavuutta turvemailla rasittavat paikoin kivennäismaita pienemmät hakkuukertymät, keskimäärin pienempi rungon koko sekä puunkorjuuajan kohtaa rajoittava turvemaan kantavuus (esim. Kojola ym. 2004, Uusitalo & Ala-Ilomäki 2013). Puunkorjuun toteutusta keskeisemmäksi ongelmaksi on 2000-luvulla noussut turvemaiden kasvihuonekaasupäästöjä sekä vesistövaikutuksia koskevat ongelmat ja niiden myötä turvemaiden metsätaloudellisen käytön yleinen hyväksyttävyys. Soiden ojituksen seurauksena laskenut vedenpinnan taso ja turpeen hapellisen kerroksen syveneminen

mahdollistaa turpeen hajoamisen (Hiraishi ym. 2014). Turpeen hajoaminen vapauttaa ilmakehää lämmittäviä kasvihuonekaasuja, kuten hiilidioksidia (CO_2) ja typpioksiduulia (N_2O) (Ojanen ym. 2018). Toisaalta ojituksen seurauksena turvemaiden puusto on saatu kasvamaan ja kasvava puusto on muodostunut hiilidioksidin nieluksi (Minkkinen ym. 2001). Hiiltä sitovan kasvavan puuston ja kasvihuonekaasuja vapauttavan hajoavan turvemaan ilmastovaikutukset ovat vastakkaisia ja toistaiseksi niiden yhteisvaikutuksen on todettu olevan ilmastoa viilentävä ensimmäisen ojituksen jälkeisen kiertoajan aikana (Ojanen ym. 2013, Minkkinen ym. 2018). Suomessa valtamenetelmänä käytetyssä tasaikäismetsätaloudessa ongelmallinen tilanne turvemaiden kohdataan siinä vaiheessa, kun kiertoajan lopussa uudistuskypsä suometsä hakataan kokonaan avoimeksi. Avohakkuun seurauksena vedenpinta nousee yleensä lähelle turvemaan pintaa, kun vettä sitova ja haihduttava puusto poistetaan kokonaan (esim. Dubé ym. 1995). Vedenpinnan nousu mahdollistaa ilmakehää lämmittävän metaanin (CH_4) vapautumiselle otolliset olosuhteet (Lähde 1971). Uuden puusukupolven kasvun varmistamiseksi avohakkuun jälkeen nousseen turpeen vedenpinnan laskeminen vaatii yleensä kunnostusojitusta, mikä puolestaan mahdollistaa edelleen turpeen hajoamisen ja hiilidioksidin (CO_2) vapautumisen (Ojanen ym. 2018). Toisin sanoen avohakkuun jälkeen turvemaata muuttuu lähes kaikissa tapauksissa pitkäksi aikaa kasvihuonekaasujen päästölähteeksi, kun hiilidioksidia sitova puusto ei ole enää kompensoimassa edellä esitettyjä päästöjä ja ylläpitämässä turvemaan vedenpinnan tasoon vaikuttavaa biologista haihdutusta. Turvemaiden metsätaloudellista käyttöä koskevien kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi suometsien käytöllä on todettu olevan haitallisia vesistövaikutuksia (esim. Mattsson ym. 2006, Finér ym. 2010). Ojitetuista turvemaametsistä kohdistuu vesistökuormitusta niin ravinteiden kuin kiintoaineiden osalta lähialueen vesistöihin (Mattsson ym. 2006). Lisäksi useiden metsätaloustoimien, kuten kunnostusojitusten, avohakkuiden ja maanmuokkausten on todettu osaltaan lisäävän ravinne- ja kiintoainepäästöjä vesistöihin, etenkin muutamana toimenpiteitä seuraavana vuonna (Finér ym. 2010).

Turvemaiden tasaikäisrakenteinen metsänkasvatus ja laajamittaisiin avohakkuihin perustuva metsänuudistaminen on toistaiseksi tehokkaaksi todettu ja korjuuteknisesti helposti toteutettava menetelmä. Kuitenkin negatiivisiin ilmasto- ja vesistövaikutuksiin liittyvien ongelmakohtien takia vaihtoehtoiset menetelmät ja uudet ratkaisut turvemaiden metsänkasvatuksessa ovat ajankohtaisia, mikäli ympäristövaikutuksiin ja tätä kautta turvemaiden metsätaloudellisen käytön kansainväliseen hyväksyttävyyteen halutaan vaikuttaa.

1960- ja 1970-luvuilla ojitetut suometsät alkavat enenevässä määrin 2020-luvulla saavuttaa metsätaloudellisen uudistuskypsyyden, mikä tasaikäismetsätaloudessa tarkoittaa pääsääntöisesti avohakkuun toteutusta. Tältä osin uudistuskypsien suometsien metsänkäsittelymenetelmien valinnassa eletään pian monin paikoin ratkaisevia aikoja. Jatkuvapeitteistä metsätaloutta ilman laajamittaisia turvemaiden avohakkuuta on kaavailtu ratkaisuksi negatiivisten ympäristövaikutusten vähentämiseksi (Nieminen ym. 2018). Käytännössä jatkuvapeitteinen metsätalous turvemailla tarkoittaa avohakkuun sijasta poiminta-, pienaukko- tai kaistalehakkuiden toteutusta (Saarinen ym. 2020). Poimintahakkuihin perustuvassa jatkuvassa metsänkasvatuksessa metsästä poistetaan yläharvennuksen tyyppisesti suurimpia sekä laadultaan heikoimpia puita ja metsän uudistuminen pyritään turvaamaan luontaisesti syntyneen taimiaineksen avulla (Valkonen 2017). Poimintahakkuun ideana on ylläpitää puustoltaan eri-ikäisrakenteista metsää, missä on kaiken kokoisia puita. Pienaukko- tai kaistalehakkuihin perustuva metsänkasvatus tarkoittaa pienialaisten aukkojen ja kaistaleiden hakkuuta, jolloin tavoitteena on puustoltaan ryhmittäin eri-ikäisrakenteinen metsä (Saarinen ym. 2020). Edellä esitetyissä hakkuumenetelmissä keskeisintä on, että käsiteltävän kohteen puustoa ei poisteta kokonaan, kuten avohakkuussa. Jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen etuna pidetään vähäisempää turvemaan vedenpinnan nousua, koska hakkuun jälkeen jäävä puusto jää ylläpitämään turvemaan biologista kuivatusta (Saarinen ym. 2020). Oletuksena on, että vähäisemmällä turvemaan vedenpinnan tason vaihtelulla pystyttäisiin vähentämään negatiivisia päästö- sekä vesistövaikutuksia, etenkin siinä tapauksessa, jos kunnostusojitustarvetta ei synny. Puuston kasvun kannalta turvemaan vedenpinnan tulisi olla loppukesästä juuriston kiivaimman kasvukauden aikana noin 30–40 cm syvyydellä turvemaan pinnasta, ettei puuston kasvukyky heikkene (Sarkkola ym. 2013).

Tasaikäismetsätalouden sijaan jatkuvapeitteisistä menetelmistä turvemailla on tois- taiseksi vain vähän tietoa, mistä syystä tutkimustiedon tarve on viime aikoina korostunut. Maa- ja metsätalousministeriön vuonna 2019 rahoittamassa metsäpolitiikkafoorumissa käsiteltiin laajan asiantuntijajoukon kesken suometsien politiikka- ja tutkimussuosituksia. Metsäpolitiikkafoorumin loppuraportissa tieteellisen näytön tarvetta korostettiin turve- maiden peitteellisen metsänkasvatuksen osalta (Schneider & Päivinen 2020). Uudet jat- kuvapeitteiseen metsäkasvatukseen tähtäävät hakkuumenetelmät aiheuttavat väistämättä muutoksia myös puunkorjuun toteutuksessa. Jatkuvapeitteiseen metsänkasvatukseen täh- täävien hakkuumenetelmien korjuuteknistä toteutusta on tärkeä tutkia, jotta menetelmille

voidaan luoda kustannustehokkaat ja teknisesti toteutuskelpoiset suositukset. Käytännökokemusten ja tutkimustiedon avulla uusien hakkuumenetelmien tuottavuus- ja kustannustasoa sekä korjuujäljen laatua voidaan verrata perinteisiin tasaikäismetsätaloudessa käytettyihin menetelmiin. Suomessa metsäteollisuuden puunhankinta perustuu nykyään lähes sataprosenttisesti koneellisesti toteutettuun tavaralajimenetelmän puunkorjuuseen (Strandström 2016). Käyttöön on vakiintunut hakkuukoneen eli harvesterin ja kuormatraktorin muodostama korjuuketju. Hakkuukoneella suoritetaan puiden kaato, karsinta sekä katkonta eri puutavaralajeiksi teollisuuden asettamien mitta- ja laatuvaatimusten mukaan (Uusitalo 2010). Kuormatraktorilla puolestaan suoritetaan hakkuukoneen katkomman puutavaran metsäkuljetus tienvarteen kaukokuljetusta varten (Uusitalo 2010). Hakkuukoneen ja kuormatraktorin työskentely muodostaa tavaralajimenetelmään perustuvan puunkorjuun kokonaisuuden, jota on tasaikäismetsätalouden harvennus- ja päätehakkuiden osalta tutkittu paljon (esim. Kuitto ym. 1994, Nurminen ym. 2006, Eriksson & Lindroos 2014, Jylhä ym. 2019). Poiminta-, pienaukko- ja kaistalehakkuiden toteutuksen osalta tutkimustietoa on huomattavasti vähemmän saatavilla. Kaistalehakkuun puunkorjuuta käsitteleviä tutkimusjulkaisuja ei ole Suomessa lainkaan ja tähän tietotarpeeseen pyritään tässä tutkimuksessa vastaamaan. Käsillä olevassa tutkimuksessa keskitytään hakkuukoneen työskentelyn tarkasteluun kaistalehakkuussa. Tarkastelussa on kaistalehakkuumenetelmän tuottavuustaso, korjuutekninen toteutus sekä puustovaurioiden määrä eri käsittelyleveyksillä mäntyvaltaisten rämeiden hakkuussa.

1.2 Kaistalehakkuumenetelmä

1.2.1 Kaistalehakkuumenetelmän periaate

Kaistalehakkuussa hakkuukohteelle sijoitetaan pitkänomaisia kaistaleita, jotka hakataan aukeaksi ja vastaavasti kaistaleita, joille jätetään puustoa kasvamaan (kuva 1). Metsänhoidon suosituksissa kaistalehakkuuta pidetään kivennäismailla tasaikäisrakenteisen metsätalouden uudistushakkuumenetelmänä (Äijälä ym. 2019). Turvemailla kaistalehakkuut voidaan tulkita osaksi jatkuvapeitteisen metsätalouden keinovalikoimaa, koska hakkuumenetelmällä voidaan mahdollistaa puuston ryhmittäinen eri-ikäisrakenteisuus ja turve- maan vedenpinnan tason säätely puuston kasvun kannalta sopivalle tasolle, ilman kunnostusojituksia ja vedenpinnan tason vaihtelun aiheuttamaa ympäristökuormitusta (Valkonen 2017, Saarinen ym. 2020). Toistaiseksi kaistalehakkuumenetelmän käyttö on ollut varsin vähäistä. Vuosina 2010–2019 Suomen metsäkeskukselle toimitetuissa metsänkäyttöilmoituksissa kaistalehakkuutavaksi on ilmoitettu vuosittain noin 1 800 hehtaaria, mikä vastaa keskimäärin 0,27 prosenttia kaikkien toimitettujen metsänkäyttöilmoitusten pinta-alasta. Tässä pinta-alassa on mukana sekä turve- että kivennäismailla metsänkäyttöilmoituksilla kirjatut kaistalehakkuut.



Kuva 1. Ilmakuva Kouvolassa syksyllä 2020 toteutetusta kaistalehakkuusta (Markus Toikka/Luke 2020).

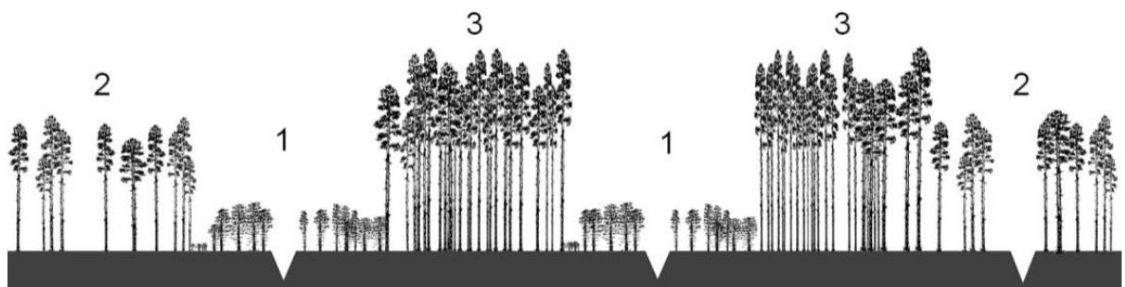
Metsänhoidon suositusten mukaan kaistalehakkuussa aukeaksi hakattavien hakkuukaistaleiden leveyden suositellaan olevan enintään 50 metriä, jotta pystyyn jäävän reunametsän siementävä vaikutus ulottuu koko hakatulle alalle (Äijälä ym. 2019). Toistaiseksi turvemailla kaistalehakkuun leveydelle ei ole olemassa suositusta, koska julkaistua tutkimustietoa erilaisten kaistalehakkuuleveyksien vaikutuksista on varsin vähän. Ojitetuilla turvemailla käytettävään hakkuukaistaleen leveyteen vaikuttaa ennen kaikkea se, kuinka hyvin pystyyn jääneet puustokaistaleet vaikuttavat avoimeksi hakattujen kaistaleiden turpeen vedenpinnan tasoon (Saarinen ym. 2020). Ojitusalueen sarkaleveys on myös tekijä, jolla on vaikutusta kaistalehakkuuleveyden suunnittelussa. Suomessa ojitusalueiden sarkaleveydessä on vaihtelua, mutta tyypillisesti ojien välinen etäisyys on 30–60 metriä (Keltikangas 1971). Pystypuustokaistaleiden biologisen kuivatusvaikutuksen säilyttämiseksi sekä keskimääräiseen sarkaleveyteen perustuen ojitetujen turvemaiden kaistalehakkuussa kaistaleen suositusleveys tulee olemaan todennäköisesti korkeintaan 30 metriä.

Kaistalehakkuumenetelmän soveltaminen onnistuu monenlaisilla kohteilla, mutta erityisesti mäntyvaltaisilla rämekohteilla kaistalehakkuumenetelmän hyödyntäminen on perusteltua (Saarinen ym. 2020). Mänty tarvitsee uudistuakseen valoa, joten poimintahakkuun tyyppinen jatkuvan kasvatuksen hakkuu ei välttämättä ole hyvä vaihtoehto mäntyvaltaisten kohteiden uudistamiseen, koska valo-olosuhteet luontaiselle taimettumiselle eivät yleensä ole otolliset. Mäntyvaltaisilla rämekohteilla (kuva 1) kaistalehakkuumenetelmän hyödyntäminen voi mahdollistaa ryhmittäisen eri-ikäisrakenteisuuden sekä riittävät valo-olosuhteet männyn uudistumiseen (Saarinen ym. 2020). Saarisen (2013) mukaan mäntyvaltaisten turvekankaiden luontaisen uudistamisen onnistumisessa korostuu valo-olosuhteiden lisäksi hakkuun jälkeisten vuosien siemensadot ja kasvukausien sääolot sekä itämiselle otollisten rahkasammalpintojen osuus kohteella. Toisaalta luontaisen uudistamisen lisäksi kaistalehakkuun toteuttaminen mahdollistaa tarvittaessa tasaikäismetsätaloudelle tyypillisen avoimeksi hakattujen kaistaleiden kevyen maanmuokkauksen ja metsänviljelyn.

Ojitetut suot, joilla ojituslaskentaa on edennyt pitkälle, luokitellaan kasvupaikan ravinteisuuden perusteella turvekangastyyppisiin (Laine ym. 2012). Laineen ym. (2012) turvekangastyyppien luokittelussa metsätaloudellisesti hyödyntämiskelpoisia mäntyvaltaisia rämekohteita ovat pääasiassa puolukka- ja varputurvekankaat. Korhosen ym. 2017

mukaan Suomen ojitetusta suopinta-alasta lähes 60 % on puolukka- tai varputurvekan-
kaita, joten tältä osin kaistalehakkuun hyödyntämiselle otollisia rämeikohteita on run-
saasti.

Kaistalehakkuu voidaan vaiheistaa useampaan ajankohtaan kuvan 2 mukaisesti (Saarinen
ym. 2020). Kahteen tai kolmeen hakkuukertaan vaiheistettu kaistalehakkuu on todennä-
köisesti järkevintä, jotta yksittäisellä hakkuukerralla poistettavan puuston määrä pysyy
puunkorjuun kannalta kannattavana. Pystyyn jäävien puustokaistaleiden osittainen har-
ventaminen on myös kaistalehakkuun yhteydessä mahdollista. Uudisojituksen jälkeen jä-
reytyneet mäntyvaltaiset rämeet ovat puustoltaan Suomessa nykyään kohtuullisen tasara-
kenteisia (Sarkkola ym. 2004). Puustoltaan tasarakenteisella ojitusalueella kaistalehak-
kuilla ryhmittäisen eri-ikäisrakenteisuuden saavuttaminen tarkoittaa, että osa mahdolli-
sesti jo varsin järeästä puustosta täytyy jättää kohteelle pystyyn. Kaistalehakkuukohteella
käsittelemättä jätetyt puustokaistaleet voivat olla kaistalehakkuun metsätaloudellista kan-
nattavuutta rasittava tekijä, etenkin silloin, kun pystyyn jäävä puusto on uudistuskypsää.
Uudistuskypsien puustokaistaleiden arvokasvu voi olla varsin heikkoa ja lisäksi niihin on
sitoutunut runsaasti puustopääomaa pitkän aikaa, koska ennen niiden hakkuuta täytyy
odottaa avoimien kaistaleiden puuston varttumista jopa kymmeniä vuosia.



Kuva 2. Havainnekuva kaistalehakkuun vaiheistamisesta kolmeen hakkuuajankohtaan ojitetulla turvemaalla (Saarinen ym. 2020)

1.2.2 Kaistalehakkuu puunkorjuun näkökulmasta

Puunkorjuun kannalta kaistalehakkuumenetelmä muistuttaa paljon avohakkuumenetelmää, mutta pienemmässä ja pirstoutuneemmassa muodossa. Jatkuvan kasvatuksen hakkuumenetelmistä kaistalehakkuun etuna on, että se voi mahdollistaa poimintahakkuuta paremman hakkuutyön tuottavuuden (m^3/h) ja pienentää puustovaurioiden riskiä, joiden on todettu olevan keskeisimpiä ongelmakohtia jatkuvan kasvatuksen hakkuissa (esim. Hämäläinen 2014, Laamanen 2014, Sirén ym. 2015). Tasaikäismetsätaloudessa harvennushakkuumenetelmän tuottavuustason on todettu olevan keskimäärin 30 % avohakkuuta heikompi käsiteltävän rungon koon ollessa sama (Kuitto ym. 1994, Brunberg 1997). Kaistalehakkuumenetelmän tuottavuustason voidaan olettaa olevan lähellä avohakkuuta, koska toisin kuin tasaikäismetsätalouden harvennushakkuissa tai eri-ikäismetsätalouden poimintahakkuissa, kaistalehakkuumenetelmässä ei tarvitse kaadettavaa puuta valitessa väistellä yhtä paljon pystyyn jääviä puita ja puuvalintaan kuluvan suunnitteluajan voi olettaa olevan pienempi. Myös kuormatraktorin työskentely-ympäristö on kaistalehakkuulla lähes avohakkuuta vastaava, mutta leimikon muodosta ja kaistaleiden suuntauksesta riippuen puutavaran metsäkuljetusmatka voi olla kaistalehakkuussa avohakkuuta pidempi. Hakkuutyön ja metsäkuljetuksen tuottavuustaso määrittävät pitkälti puunkorjuun yksikkökustannuksen ($\text{€}/\text{m}^3$) ja vaikuttavat puunkorjuun kannattavuuteen.

Kaistalehakkuunimikkeellä tehtyjä puunkorjuuta käsitteleviä tutkimuksia ei juurikaan ole tehty, mutta pienaukkohakkuiden osalta muutamia puunkorjuun tuottavuutta tarkastelevia tutkimuksia on julkaistu. Kaistale- ja pienaukkohakkuiden ero on lähinnä avoimeksi hakattavana aukon muodossa, joka kaistalehakkuussa on pitkänomainen ja pienaukkohakkuussa pyöreähkö. Tältä osin raja menetelmien välillä on häilyvä ja kaistalehakkuuta voidaan tietyssä määrin tarkastella pienaukkohakkuilta saatujen tulosten pohjalta. Ruotsissa Eliasson ym. (2020) tarkastelivat eroja puunkorjuun ajanmenekissä ja tuottavuudessa pienaukkohakkuiden ja laajamittaisten avohakkuiden välillä. Tarkastelussa oli sekä hakkuu- että metsäkuljetustyö kivennäismaakohteilla. Tutkimuksessa pienaukkohakkuut muodostivat shakkilautaa muistuttavan kohteen, missä puolet palstoista oli hakattu ja puolet jätetty kasvamaan. Yksittäinen pienaukko oli 30 metriä leveä ja 45 metriä pitkä, pitempi sivu etelä-pohjoissuuntaisesti kulkien. Hakkuutyön tarkastelun osalta tutkimusaineistona hyödynnettiin hakkuukoneen keräämää aikaleimattua hpr-aineistoa. Aineiston analysointi tehtiin työvuorotasolla hyödyntäen työvuorotasolla laskettuja keskitunnuksia.

Aineiston muodosti yhteensä 48 työvuorua. Eliassonin ym. (2020) tutkimuksen tulosten mukaan hakkuutyön tuottavuus oli 15–20 % pienempi pienaukkohakkuilla kuin avohakkuilla käsiteltävän rungon koon ollessa 0,3–0,6 m³. Tutkimuksessa kuormatraktorin metsäkuljetusmatkan todettiin kasvaneen 29 % pienaukkohakkuulla verrattuna avohakkuuseen ja metsäkuljetuksen tuottavuustason todettiin olevan pienaukkohakkuulla 16 % pienempi. Tutkimuksessa saatujen tuottavuustasojen perusteella korjuukustannusten todettiin olevan pienaukkohakkuilla 18 % korkeammat kuin avohakkuilla. Norjassa Suadicanin ja Feldtin (2001) vertailivat yksioteharvesterin tuottavuutta kuusikoissa toteutetuissa poiminta- ja pienaukkohakkuissa. Tutkimuksessa käytettiin pienaukkoja, jotka olivat kooltaan joko 25 m × 25 m tai 50 m × 50 m. Suadicanin ja Feldtin (2001) tulostensa perusteella poimintahakkuilla hakkuutyön tuottavuus oli 10–15 % pienaukkohakkuita pienempi. Eliassonin ym. (2020) sekä Suadicanin ja Feldtin (2001) tutkimusten tulosten perusteella pienaukkohakkuun tuottavuustaso sijoittuu avohakkuiden ja poimintahakkuiden väliin.

Turvemaiden puunkorjuussa maaston kantavuus on keskeinen tekijä, joka vaikuttaa sekä hakkuukoneen että kuormatraktorin työskentelyyn (Ala-Ilomäki ym. 2011, Uusitalo & Ala-Ilomäki 2013). Ajouran havutus on tärkeä toimenpide, jolla ajourapainaumien syntymistä voidaan välttää ja maaston kantavuutta voidaan osin lisätä (esim. Eliasson & Wästerlund 2007, Labelle & Jaeger 2012). Kaistalehakkuu mahdollistaa harvennushakkuuta ja poimintahakkuuta runsaamman ajouran havutuksen ja kantavoittamisen, koska ajouran varresta poistettava puumäärä on kaistalehakkuumenetelmässä suurempi. Turvemailla samoja ajouria joudutaan ajamaan kuormatraktorilla yleensä useita kertoja ja ajokertojen määrästä sekä kuormapainosta riippuen merkittäviä ajourapainauksia voi syntyä jo muutamien ajokerran jälkeen (Nugent ym. 2003, Ala-Ilomäki ym. 2011). Uusitalon ym. (2015) mukaan leveämmän ajouran ja useiden ajolinjojen käyttö voi vähentää raiteistumista turvemaiden puunkorjuussa. Kaistalehakkuussa koko kaistaleen leveys on käytettävissä, mikä mahdollistaa metsäkuljetusvaiheessa kuormatraktorille useamman ajolinjan käytön ajourapainaumien välttämiseksi. Useista korjuuteknisten syiden perusteella kaistalehakkuumenetelmä vaikuttaa tehokkaalta ja potentiaaliselta hakkuumenetelmältä turvemaiden puunkorjuuseen.

1.3 Hakkuutyön aika- ja tuottavuustutkimus

1.3.1 Koneellisen hakkuutyön aika- ja tuottavuustutkimusten tausta

Hakkuutyön aika- ja tuottavuustutkimus on keskeinen osa metsätyön tutkimusta. Hakkuutyön aikatutkimuksessa selvitetään lähtökohtaisesti hakkuutyöhön kuluvaa aikaa ja sen rakennetta eri työvaiheiden osalta (Magagnotti ym. 2012). Tuottavuustutkimuksessa tarkasteluun otetaan ajanmenekin lisäksi mukaan tuotos eli hakkuutyön tapauksessa yleensä käsitelty puumäärä. Tuottavuustutkimuksen tuloksena saadaan selville panos-tuotossuhde, mikä hakkuutyön tuottavuustutkimuksessa kuvataan yleensä käsiteltynä puumääränä aikayksikköä kohden (esim. m³/h tai runkoa/h). Hakkuutyön aika- ja tuottavuustutkimusta tarvitaan ensisijaisesti tuottavuuteen vaikuttavien tekijöiden selvittämiseen ja hakkuutyön maksuperusteiden määrittämiseen (Kuitto ym. 1994). Lisäksi hakkuutyön aika- ja tuottavuustutkimuksella on keskeinen merkitys hakkuumenetelmien ja uuden korjuuteknologian kehittämisessä sekä vertailemisessa (Kuitto ym. 1994, Nurminen ym. 2006, Ovaskainen 2012).

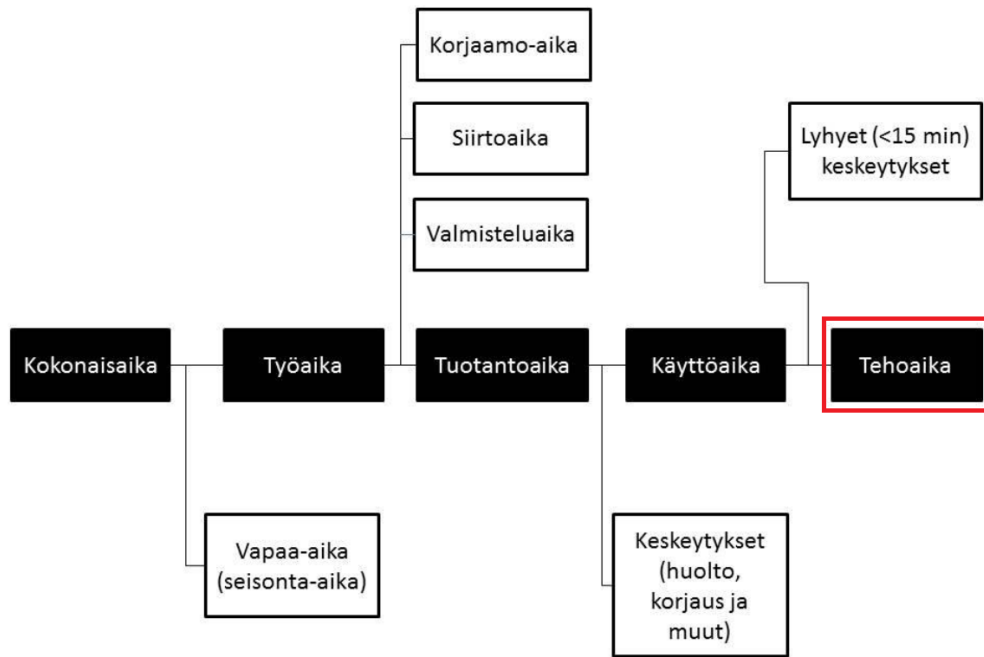
Jylhän ym. (2019) mukaan metsätyön tutkimus on murrosvaiheessa metsäkoneiden keräämän valtavan tietomäärän tarjoamien mahdollisuuksien myötä. Metsäkoneiden laajentuvalla tiedonkeruukapasiteetilla on myös vaikutusta hakkuutyön aika- ja tuottavuustutkimusten toteutukseen. Perinteisesti hakkuutyön aikatutkimusten aineistot on kerätty kokeellisesti kelloaikatutkimuksena niin, että käynnissä olevalla hakkuutyömaalla on määritetty hakkuutyön työvaiheajat joko maastotallentimella paikan päällä tai videoidun aineiston perusteella jälkeenpäin (Nuutinen 2013). Nykyään hakkuukoneet keräävät tietojärjestelmiinsä automaattisesti valtavan määrän työvaihekohtaista ajanmenekkitietoa, mikä mahdollistaa entistä kustannustehokkaammin hakkuutyön ajankäytön tarkastelun ja hakkuutyön laajojen seurantatutkimusten toteuttamisen (Nuutinen 2013, Jylhä ym. 2019). Automaattisen tiedonkeruun tarjoamista mahdollisuuksista huolimatta edelleen pienien aineistojen osalta esimerkiksi hakkuumenetelmien tutkimuksessa perinteisiin empiirisen kelloaikatutkimuksen käytäntöihin ja manuaaliseen työvaiheluokitteluun perustuvat hakkuutyön ajanmenekki- ja tuottavuustutkimukset ovat käypä vaihtoehto. Perinteisellä aikatutkimusmenettelyllä on mahdollista tarkastella visuaalisesti hakkuutyön osalta teki-

jöitä, jotka jäävät automaattisessa tiedonkeruussa huomioimatta (Nuutinen 2013). Manuaalisesti toteutettavaan kelloaikatutkimukseen perustuvien menetelmien käyttö on ollut viime vuosina edelleen aktiivista (esim. Kärhä ym. 2018, Vahtila 2019, Laitila ym. 2020).

Metsätyön aika- ja tuottavuustutkimus voidaan toteuttaa vertailevana tutkimuksena, mallinnustutkimuksena tai näiden yhdistelmänä (Magagnotti ym. 2012). Etenkin menetelmien ja koneiden vertailemiseen on hyödynnetty vertailevan aikatutkimuksen periaatteita (esim. Lindroos 2010, Laitila ym. 2013, Kärhä ym. 2018). Yleensä metsätyön tutkimuksessa vertailevan aikatutkimuksen perusajatuksena on, että useampi henkilö työskentelee vertailtavilla menetelmillä tai koneilla mahdollisimman vakioituissa olosuhteissa. Saatu- jen tulosten perusteella voidaan tarkastella eroavatko henkilöiden tekemän työn ajanmenekki tai tuottavuustaso vertailtavilla menetelmillä tai koneilla samansuuntaisesti. Jos jokin tarkasteltavista menetelmistä tai koneista vaikuttaa vertailukelpoisissa olosuhteissa kaikkien kuljettajien tuottavuuteen selkeästi positiivisesti, voidaan kyseisen menetelmän olettaa olevan otoskoosta ja asetetusta luottamustasosta riippuen nopeampi tai tuottavampi kuin muiden vertailtavien menetelmien (Lindroos 2010). Mallinnustutkimuksena eli korrelaatiotutkimuksena toteutettu metsätyön aika- tai tuottavuustutkimus puolestaan pyrkii selittämään yksittäisten muuttujien, kuten rungon koon vaikutusta ajanmenekkiin tai tuottavuuteen (Magagnotti ym. 2012). Vertailevaan tutkimusmenetelmään perustuvissa tutkimuksissa hyödynnetään yleensä myös mallinnusta esimerkiksi siitä syystä, että vertailtavien menetelmien olosuhteet vaihtelevat jonkun tekijän osalta ja menetelmien vertailemiseksi tämän tekijän vaikutus on pyrittävä vakioimaan (Lindroos 2010).

1.3.2 Hakkuutyön tarkastelutasot ja työvaiheet

Hakkuutyön aikatutkimuksessa on käytössä erilaisia tarkastelutasoja, riippuen siitä, missä laajuudessa hakkuutyötä tarkastellaan. Empiirisissä yksittäisille hakkuukohteille sijoituvissa kelloaikatutkimuksissa, tarkasteltavana on yleensä tehoaika ja käyttöaika (kuva 3). Tehojalla (E_0) tarkoitetaan hakkuutyötä ilman keskeytyksiä ja käyttöaika (E_{15}) puolestaan sisältää tehoajan lisäksi alle 15 minuutin mittaiset keskeytykset. Varsinaiseen hakkuutyöhön keskeytyksiä voivat aiheuttaa esimerkiksi mekaaniset häiriöt hakkuukoneessa tai muut kuljettajasta johtuvat keskeytykset ja tauot (Magagnotti ym. 2012).



Kuva 3. Mäkelän (1987) havainnekuva metsätyön aikajaottelun tasoista. Tässä tutkimuksessa kaistalehakkua tarkastellaan punaisella korostetun tehoajan osalta.

Teho- ja käyttöajan lisäksi hakkuutyötä voidaan tarkastella laajemmin kuvassa 3 esitettyjen tuotantoajan, työajan ja kokonaisajan osalta. Nämä ovat tarkastelutasoja, joita tutkitaan yleensä hakkuutyön seurantatutkimuksissa laajempaan kuukausia tai jopa vuosia kattavaan hakkuukoneen seuranta-aineistoon perustuen.

Hakkuutyön työpistetasolla suoritettussa aikatutkimuksessa hakkuutyö jaetaan yleensä työvaiheisiin, joille määritetään ajanmenekit. Yksittäisten työvaiheiden ajanmenekkien määrittämisen avulla työvaiheajoja ja niihin vaikuttavia tekijöitä voidaan tarkastella hakkuutyön tehoajanmenekkiä tarkemmalla tasolla (Kuitto ym. 1994). Kariniemen ja Vartiamaen (2010) mukaan hakkuutyö voidaan jakaa kolmeen päätyövaiheeseen, jotka ovat puun haltuunotto, puun kaato ja rungon valmistus. Nämä päätyövaiheet toistuvat jokaisen rungon hakkuun yhteydessä. Päätyövaiheiden lisäksi hakkuutyössä on eroteltavissa työvaiheita, jotka eivät esiinny jokaisen rungon kohdalla. Näitä työvaiheita ovat mm. siirtyminen, alikasvoksen raivaus ja hakkuulaitteen tuonti hakkuukoneen eteen. Magagnottin ym. (2012) mukaan työvaihejaottelu mahdollistaa yksittäisten työvaiheiden tarkastelun lisäksi tehokkaan työajan ja viiveaikojen eli tehottoman työajan erottamisen kokonais työajasta. Hakkuutyön työvaihejaottelussa on eroja tutkimusten välillä, riippuen tutkimusasetelmasta ja tutkimustiedon käyttötarpeesta. Yleistä linjausta koneelliseen tavara-lajimenetelmään perustuvan puunkorjuun työvaihejaottelulle ei siis ole, koska jaottelu

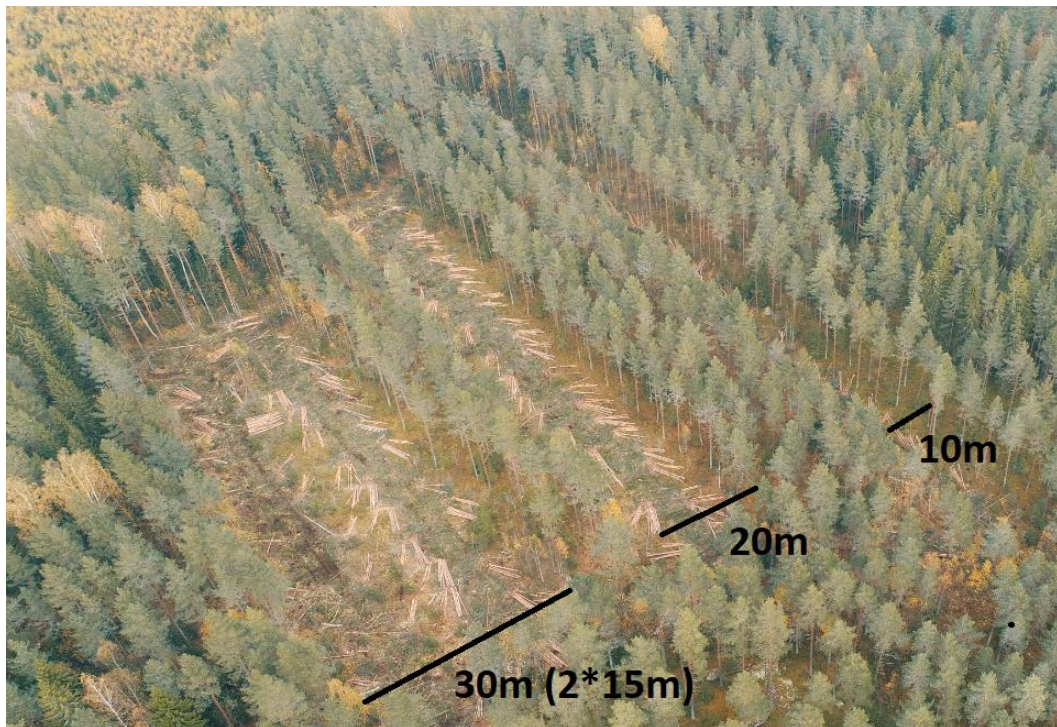
tehdään useimmiten kunkin tutkimuksen tarpeita vastaavalla tarkkuudella. Perusrakenteeltaan hakkuutyön työvaiheluokittelu on kuitenkin tutkimuksissa kohtalaisen yhteneväistä.

1.3.3 Hakkuutyön tuottavuuteen vaikuttavat tekijät

Hakkuutyön tuottavuustutkimuksissa tuottavuutta mallinnetaan yleensä käsiteltävien runkojen tilavuuden perusteella, koska rungon koon on useissa tutkimuksissa todettu olevan keskeisin hakkuutyön tuottavuutta selittävä tekijä (esim. Kuitto ym. 1994, Nurminen ym. 2006, Jylhä ym. 2019). Hakkuukoneenkuljettajan on myös todettu monissa tutkimuksissa olevan keskeinen hakkuutyön ajanmenekkiin ja tuottavuuteen vaikuttava tekijä (esim. Rajamäki ym. 1996, Purfürst & Erler 2006, Ovaskainen 2009, Malinen ym. 2018). Rungon koko ja hakkuukoneen kuljettaja selittävät yhdessä jopa 84 % hakkuutyön tuottavuuden kokonaisvaihtelusta (Purfürst & Erler 2011). Kuljettajien vaihteleva taitotaso ja työtekniikka ovat keskeisimmät tekijät, jotka johtavat eriasteisiin tuottavuustasoihin kuljettajien välillä. Kuljettajan vaikutus tiedostetaan monissa tutkimuksissa ja tästä syystä erilaisia hakkuumenetelmiä tutkitaan yleensä vertailevan aikatutkimuksen periaatteita hyödyntäen. Kuljettajan ja rungon keskitilavuuden lisäksi koneellisen hakkuutyön tuottavuuteen vaikuttavat mm. hakkuumenetelmä, käsiteltävä puulaji, hakkuukohteen runkoluku, katkottavien puutavaralajien määrä, maastoluokka, alikasvoksen määrä, työtekniikka ja metsäkonetyyppi (esim. Kuitto ym. 1994, Rajamäki ym. 1996, Kärhä ym. 2006, Nurminen ym. 2006, Ovaskainen 2012, Eriksson & Lindroos 2014, Jylhä ym. 2019).

1.4 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa tietoa turvemaalla toteutettavan kaistalehakkuun korjuuteknisestä toteutuksesta hakkuutyön osalta ojitetussa rämemännikössä. Tavoitteena oli erityisesti selvittää hakkuukaistaleen leveyden vaikutusta hakkuutyön tuottavuuteen. Toistaiseksi turvemaiden kaistalehakkuulle ei ole olemassa suositusleveyttä, joten hakkuutyön ajanmenekki- ja tuottavuustasoerojen selvittämiseksi tarkasteluun otettiin kaistalehakkuumenetelmässä kaistaleen leveydet 10 m, 20 m ja 30 m. 10 ja 20 metriä leveät kaistaleet hakattiin yhdeltä hakkuu-uralta. 30 metriä leveä kaistale hakattiin puolestaan kahdelta hakkuu-uralta käyttäen kahta 15 metriä leveää käsittelykaistaletta (kuva 4). Kaistalehakkuutyön ajanmenekin ja tuottavuustason selvittämisen yhteydessä tarkasteltiin käsittelyleveyden vaikutusta hakkuukoneen kuljettajan työskentelyyn ja tämän käyttämään työtekniikkaan. Kaistalehakkuun jälkeen hakkuukaistaleiden viereen pystyyn jääviltä puustokaistaleilta määritettiin puustovauriomäärät, jotta kaistalehakkuumenetelmän vaikutusta puustovaurioiden esiintyvyyteen pystyttiin arvioimaan. Kaistalehakkuutyön tuottavuustason, työtekniikan ja puustovaurioiden tarkastelun lisäksi tutkimuksen tavoitteena oli lisätä yleistä tietoisuutta ja käytännönkokemuksia kaistalehakkuun toteuttamisesta turvemaiden puunkorjuussa.



Kuva 4. Havainnekuva tutkimuksessa tarkasteltavista kaistalehakkuuleveyksistä (Markus Toikka/Luke 2020).

Työn keskeisimmät tutkimuskysymykset ovat:

1. Onko hakkuukaistaleen leveydellä vaikutusta hakkuutyön ajanmenekkiin ja tuottavuuteen rämemännikön kaistalehakkuussa?
2. Mistä mahdollinen hakkuutyön ajanmenekki- ja tuottavuusero kaistalehakkuun käsittelyleveyksien välillä aiheutuu?
3. Minkä verran kaistalehakkuussa syntyy puustovaurioita pystyyn jääviin vieruskaistaleisiin?

2 AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Kaistalehakkuuleimikot, kuljettajat ja kalusto

Tutkimusaineisto kerättiin kahdelta kaistalehakkuukohteelta. Kohteet sijaitsivat Kymenlaaksossa Kouvolassa (60°34'45.4"N 26°45'17.3"E) ja Pohjois-Pohjanmaalla Sievissä (63°52'28.5"N 24°19'07.5"E). Hakkuut toteutettiin sulan maan aikaan Kouvolassa lokakuussa 2020 ja Sievissä marraskuussa 2020. Sademäärät olivat syksyllä 2020 mittaushistoriaan suhteutettuna keskimääräisellä tasolla sekä Kouvolassa että Sievissä (Ilmatieteen laitos 2020).

Tutkimusleimikot olivat tutkimushankkeen yhteistyökumppaneiden omistamia metsäalueita. Tornator Oyj:n kaistalehakkuukohde Kouvolassa oli pinta-alaltaan noin 14,5 ha ja kasvupaikaltaan puolukkaturvekangas II. Kymijoen varressa Kouvolassa sijaitsevan kohteen ojien sarkaleveys vaihteli 30 m ja 60 m välillä, keskimäärin sarkaleveys oli 45 m. Sievissä sijaitseva Metsähallituksen kaistalehakkuukohde oli kasvupaikaltaan puolukkaturvekangas I ja kohteella hakkuutyön aikatutkimukseen käytetyn alueen pinta-ala oli noin 2,9 ha. Sievin tutkimuskohteella sarkaleveys oli keskimäärin 40 metriä. Tutkimusleimikot olivat puustoltaan hyvin samankaltaiset. Kummallakin kohteella mänty oli pääpuulajina ja alemassa latvuserroksessa oli paikoitellen ainespuukokoisia hieskoivuja ja kuusia. Kouvolan tutkimuskohteella runkoluku oli keskimäärin 514 r/ha ja Sievissä 592 r/ha, kun mukaan lasketaan kaikki ainespuukokoiset rungot. Kouvolassa puustoa oli 169 m³/ha ja Sievissä 167 m³/ha. Kouvolan kohteella puuston kokonaistilavuudesta 99 % ja Sievin kohteella 91 % oli mäntyä.

Kaistalehakkuuta tarkasteltiin kolmen kokeneen hakkuukoneenkuljettajan työskentelyn perusteella. Tutkimuksen kuljettajilla oli vähintään kahdeksan vuotta kokemusta hakkuukonetyöskentelystä (taulukko 1). Kaikki tutkimuksessa mukana olleet kuljettajat työskentelivät John Deere Forestry'n 1170-mallin yksioteharvestereilla. Kuljettajat A ja B työskentelivät Kouvolassa samalla hakkuukoneella siten, että kuljettaja A työskenteli aamuvuorossa ja kuljettaja B iltavuorossa. Kuljettaja C työskenteli Sievissä vain aamuvuorossa. Hakkuukoneissa oli puomin liikkeitä seuraava ohjaamo sekä telavarustelu (kuva 5). Kouvolan hakkuukone oli varusteltu KOPA -kantavilla teloilla ja Sievin kone etuakselin osalta Olofsforsin teloilla. Taulukossa 1 on eritelty tarkemmin tutkimuksessa mukana olleiden kuljettajien sekä hakkuukoneiden tietoja.

Taulukko 1. Keskeisimmät kuljettajia ja hakkuukoneita koskevat ominaisuustiedot.

KULJETTAJATIEDOT			
Kuljettaja	A	B	C
Leimikko	Kouvola	Kouvola	Sievi
Työkokemus hakkuukone- netyöstä, v	18	15	8
HAKKUUKONETIEDOT			
Merkki	John Deere		John Deere
Malli	1170G		1170E
Valmistusvuosi	2019		2016
Teho, kW	155		145
Pyörien lukumäärä	8		6
Telat	KOPA		Olofsfors
Kokonaismassa, t	24,7		
Hakkuupää	H414		H413
Puomi	CH6		CH6
Bruttonostomomentti, kNm	165		165
Puomin ulottuma, m	11,3		11,3

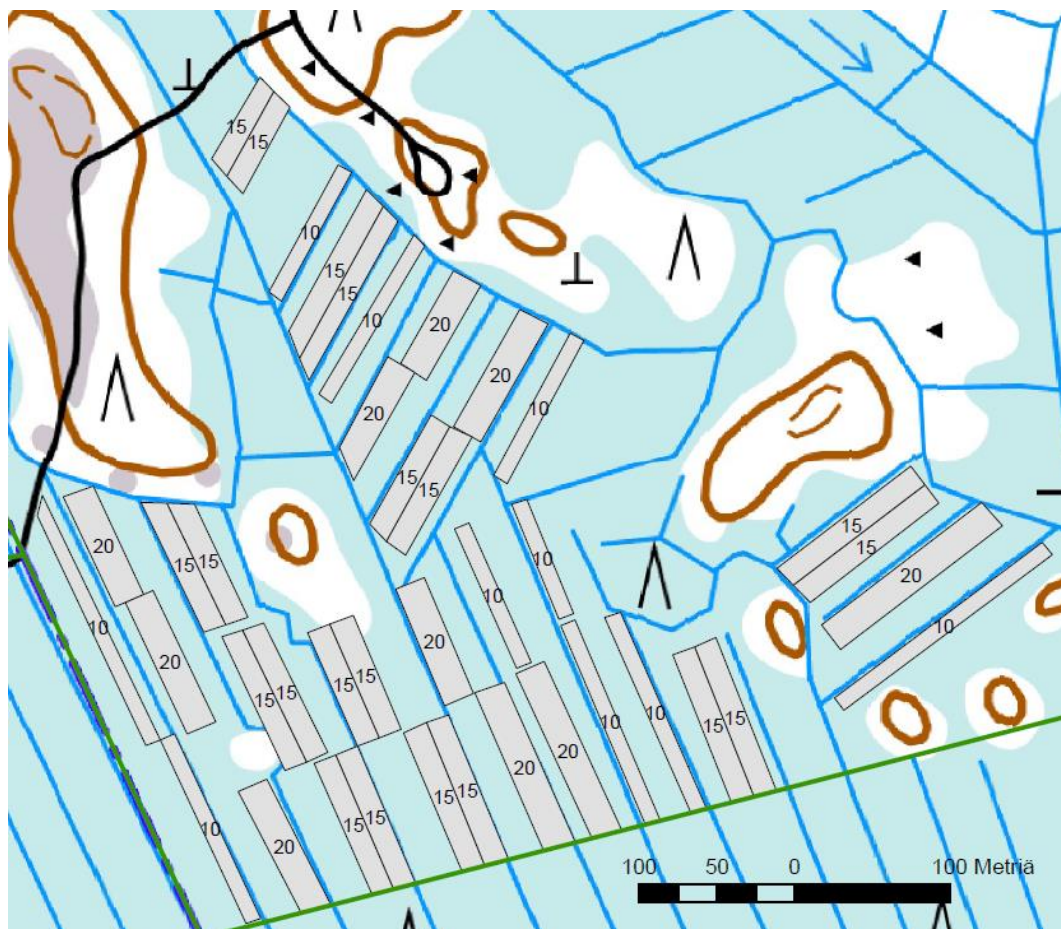
Kumpikin tutkimuksessa mukana olleista hakkuukoneista oli käytössä huonosti kantavilla mailla vuoden ympäri ja kaikki kolme kuljettajaa olivat tottuneita turvemailla työskentelyyn. Kuljettajille toimitettiin ennen kaistalehakkuun toteutusta lyhyt kirjallinen ohjeistus ja karttahahmotelma kaistalehakkuun toteutuksesta tutkimuskohteilla. Tutkimuskohteilla kuljettajille vielä opastettiin kaistalehakkuun periaatteet.



Kuva 5. Tutkimuksessa käytetyt John Deere -merkkiset hakkuukoneet. Vasemmalla Kouvolan ja oikealla Sievin kaistalehakkuulla käytetty hakkuukone.

2.2 Koealajärjestelyt tutkimusleimikoissa

Kaistalehakkuukoealojen sijoittelussa piti ottaa tämän tutkimuksen tavoitteiden lisäksi huomioon samoilla kohteilla käynnistettävät SuoPPP-tutkimushankkeen uudistumisen-seurantatutkimukset, mikä osaltaan määrittä koealojen sijoittelua. Kummallakin tutkimuskohteella kaistalehakkuun aikatutkimuskoealat sijoitettiin tutkimusleimikoille ojien suuntaisesti siten, että kaistale kulki ojaa myöden tai keskellä sarkaa niin, että kumpikin kaistaleen reuna oli ojista irrallaan (kuva 6). Käsittelyleveyksien luotettavaksi vertailemiseksi pyrittiin koealasijoittelulla saavuttamaan käsittelyleveyksien osalta mahdollisimman vertailukelpoiset olosuhteet, joten leveydeltään erisuuruisia kaistalekoealoja pyrittiin sijoittamaan kummallekin tutkimusleimikolle mahdollisimman tasaisesti. Koealojen sijoittelun suunnittelussa hyödynnettiin maastokäynneillä kerättyä ennakkotietoa sekä avointa paikkotietoaineistoa, erityisesti maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoista luotuja latvusmalleja (CHM) ja maaston korkeusmalleja (DEM).



Kuva 6. Kouvolan kaistalehakkuukohteen aikatutkimuskoealat.

Kaistalekoealat olivat vaihtelevan pituisia, koska tutkimuskohteiden sarkapituudet haluttiin hyödyntää täysimääräisesti (kuva 6). Keskimäärin yksittäisen aikatutkimuskoealan pituus oli Kouvolassa 100 m ja Sievissä 75 m. Kaistalehakkuukoealojen reunalinjojen sijainnit merkittiin kuitunauhalla maastoon ennen hakkuun toteutusta. Koealojen reunat ja päädyt merkittiin punaisella tai keltaisella kuitunauhalla. 30 metriä leveällä kaistaleella käytettiin sinistä kuitunauhaa erottamaan 15 metriä leveät käsittelykaistaleet toisistaan. Kouvolan koekohteella nauhoitettiin yhteensä 40 kaistalehakkuukoealaa (kuva 6) ja Sievin kohteella 12. Yksittäisen aikatutkimuskoealan koko oli keskimäärin 0,14 ha.

2.3 Aineiston kerääminen tutkimusleimikoilta

Hakkuutyön aika- ja tuottavuustutkimusta varten tarvittiin tiedot puunkorjuun ajanmenekistä työvaiheittain sekä käsitelystä puumäärästä eli tuotoksesta. Ajanmenekkiaineisto kerättiin videoimalla hakkuutyö hakkuukoneen ohjaamoon kiinnitetyllä GoPro-videokameralla. Tässä tutkimuksessa käytettiin GoPro4 -videokameraa, joka oli kiinnitetty hakkuukoneen ohjaamon etuikkunallasin vasempaan alareunaan. Video käynnistettiin aina ennen kaistalekoealan alkua ja pysäytettiin, kun koealan hakkuu tuli päätökseensä. Hakkuukoekaistaleilla käsiteltyjen runkojen tilavuustiedot saatiin hakkuukoneen mittaamien tietojen perusteella. Nykyaikaisista yksiotteharvestereista on mahdollista ladata Stanford-tiedonsiirtostandardiin (Standard for forest machine data and communication) perustuvat yksityiskohtaiset tiedot käsiteltyjen runkojen ja katkottujen pöllien dimensioista ja tilavuuksista. (tiedostomuodot *.stm tai *.hpr). Koealakohtaiset tuotostiedot ladattiin hakkuukoneelta muistitikulle jokaisen koealan jälkeen. Kouvolan leimikolla hakkuukoneelta ladattiin *.stm-tiedostot ja Sievissä *.hpr-tiedostot.

Lopullisen aikatutkimuksessa käytetyn aineiston muodosti 48 koealaa. Kouvolasta aikatutkimukseen saatiin yhteensä 37 koealaa, kolme koealaa jäi aikatutkimuksesta pois niiden videoinnissa ilmenneiden ongelmien takia. Sievistä kertyi 11 koealaa, yhden koealan jäätyä kesken maaston heikon kantavuuden vuoksi. Aikatutkimuksessa mukana olleiden koealojen kokonaispinta-ala oli 6,74 ha. Käsiteltyjä runkoja kertyi 3 562 kpl ja poistuma oli yhteensä 1 134 m³. Tarkemmat poistumatiedot kuljettajittain ja käsittelyleveyksittäin on esitetty taulukossa 2. Videoitua hakkuutyötä kaistalehakkuusta kertyi yhteensä 30,4 h. Keskimäärin yksittäisen koealan hakkuun kesto oli 38 min.

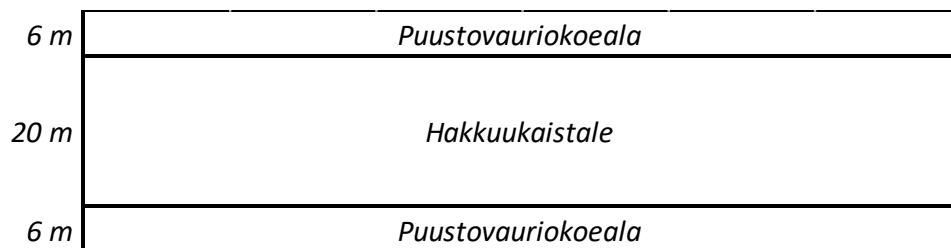
Taulukko 2. Kaistalehakkuun aika- ja tuottavuustutkimuksessa käytetty aineisto kuljettajittain, käsittelyleveyksittäin ja puulajeittain eriteltynä.

Kuljettaja ja käsitte- lyleveys	Koe- alat, kpl	Pinta- ala, ha	Runkoja, kpl			Poistuma, m ³			Rungon keskijäreys, dm ³		
			Mänty	Kuusi	Koivu	Mänty	Kuusi	Koivu	Mänty	Kuusi	Koivu
A	17	2,47	1103	32	107	404	2	3	366	59	27
10	5	0,57	241	10	25	86	1	1	355	99	24
15	8	1,19	549	14	60	208	1	2	379	41	27
20	4	0,72	313	8	22	110	0	1	352	38	31
B	20	3,00	1350	7	214	509	0	5	377	58	23
10	5	0,67	313	2	28	115	0	1	368	70	25
15	10	1,37	613	4	120	224	0	3	365	61	23
20	5	0,96	424	1	66	170	0	1	400	22	22
C	11	1,26	583	94	72	191	5	14	327	57	197
10	2	0,17	84	18	14	22	1	3	259	64	185
15	6	0,66	306	61	42	109	3	9	357	56	218
20	3	0,43	193	15	16	60	1	2	310	52	152
Kaikki	48	6,74	3036	133	393	1104	8	22	364	57	56
10	12	1,41	638	30	67	223	2	4	349	76	58
15	24	3,21	1468	79	222	541	4	14	369	54	61
20	12	2,11	930	24	104	340	1	5	365	46	44

Tutkimusleimikoilla katkottiin sekä tukki- että kuitupuuta. Kummankin leimikon pääpuulajin männyn osalta minimilatvaläpimitta tukeille oli 15 cm ja kuitupuulle 6 cm. Mäntyrunkojen keskikoko oli Kouvolassa 375 dm³ ja Sievissä 327 dm³.

2.4 Puustovaurioiden määrittäminen

Kaistalehakkuun jälkeen hakkuukaistaleiden viereisten pystyyn jätettyjen puustokaistaleiden puustovauriot laskettiin. Puustovaurioiden laskenta suoritettiin siten, että jokaisen hakkuukoealan osalta kummallekin kaistalehakkuukoealan viereen jääneelle pystykaistaleelle sijoitettiin kuusi metriä leveät koko hakkuukaistaleen pituiset puustovauriokoealat kuvan 7 mukaisesti. Puustovauriokoealojen osalta päädyttiin kuusi metriä leveän koealan mittaamiseen, koska kyseisen leveyden todettiin kattavan suurin osa pystykaistaleille syntyneistä vaurioista ja lisäksi kyseisen leveyden mittaaminen onnistui kohteilla joutuisasti.



Kuva 7. *Hahmotelma puustovaurioiden määrittämiseen käytettyjen 6 metriä leveiden puustovauriokoealojen sijainnista 20 metriä leveän hakkuukaistaleen reunoilla.*

Puustovauriokoealoilta kirjattiin jokainen rinnankorkeusläpimitaltaan yli 7 cm kokoinen vaurioitunut ja vaurioitumaton puu. Puustovaurio kirjattiin Suomen metsäkeskuksen käyttämän puustovauriomääritelmän täyttyessä. Suomen metsäkeskuksen määritelmän mukaan puu on vaurioitunut, kun rungon pinta on rikkoutunut nilakerrokseen saakka rinnankorkeusläpimitan alapuolelta yli 12 cm² tai koko rungon alueelta yli 30 cm² (Leivo ym. 2020). Myös juurenniskoihin ja alle metrin etäisyydellä rungon keskipisteestä sijaitseviin juuriin kohdistuneet yli 12 cm² vauriot johtavat siihen, että puu luokitellaan vaurioituneeksi. 12 cm² alue vastaa pinta-alaltaan noin tulitikkuaskin kokoista aluetta. Vauriopuiden osalta kirjattiin ja mitattiin lisäksi rinnankorkeusläpimitta, puulaji, puun etäisyys kaistalehakkuukoealan reunasta sekä vaurion sijainti rungossa.

2.5 Aineiston käsittely ja analysointi

2.5.1 Kaistalehakkuun työvaihejaottelu

Yksittäiset hakkuutyön työvaiheajat selvitettiin, koska niiden avulla pystyttiin tarkastelemaan, mistä mahdolliset erot tehoajanmenekin ja tuottavuustason osalta vertailtavien kaistalehakkuuleveyksien välillä syntyvät. Videoidulle kaistalehakkuuaineistolle suoritettiin työvaiheiden kellotus tunnistamalla videolta jokainen yksittäinen hakkuutyövaihe. Työvaiheiden kellotus suoritettiin Microsoft Excel-taulukkolaskentaohjelmaan luodulla aikatutkimussovelluksella. Aikatutkimussovelluksella käynnissä olevalta hakkuuvideolta määritettiin jokaisen työvaiheen aloitus- ja päättymishetki, joiden perusteella ohjelma laski automaattisesti yksittäisen työvaiheen ajanmenekin ja tallensi sen työvaihekoodilla muistiin.

Tutkimuksessa käytetyt työvaiheet ja työvaiheiden kuvaukset:

- **Siirtyminen:** Työvaihe alkaa hakkuukoneen liikkeellelähdestä ja päättyy, kun hakkuukone aloittaa jonkin toisen työvaiheen. Siirtymistyövaiheen osalta kirjattiin erikseen osatyövaiheet: ajo eteen- ja taaksepäin.
- **Hakkuulaitteen vienti puulle:** Työvaihe alkaa, kun hakkuukoneen puomi lähtee liikuttamaan hakkuulaitetta kohti kaadettavaa puuta ja päättyy kun hakkuulaite on kaadettavaa puuta vasten ja kaatosahaus alkaa.
- **Kaato ja tuonti:** Työvaihe alkaa kaatosahauksen aloitushetkestä ja päättyy, kun hakkuulaitteen syöttörullat aloittavat puun syötön prosessointia varten. Rungon osittainen syöttö sisältyy työvaiheeseen siinä tapauksessa, mikäli runko ei ole vielä kasalla tai kaadettavan puun latva ei ole koskettanut maata, eli puu ei ole vielä kaatunut.
- **Prosessointi:** Rungon valmistus eli prosessointi tarkoittaa rungon karsintaa ja puutavaralajien katkontaa omiin kasoihinsa. Työvaihe alkaa, kun hakkuulaitteen syöttörullat aloittavat puun syötön ja päättyy viimeisen pöllin katkaisusahaukseen. Työvaiheeseen sisältyy rungon prosessoinnin aikana tapahtuvat puutavaralajikasojen järjestelyt.
- **Hakkuulaitteen tai latvan tuonti eteen:** Työvaihe alkaa yleensä prosessoinnin päättyttyä, kun puomi lähtee liikuttamaan hakkuulaitetta kohti hakkuukonetta ja päättyy kun hakkuulaite pysähtyy hakkuukoneen eteen. Työvaihe esiintyy yleensä ennen kuin hakkuukone lähtee siirtymään seuraavaan työpisteeseen. Tässä tutkimuksessa hakkuulaitteen tuonti eteen ja latvan tuonti uralle on kelloitettu omiksi työvaiheikseen mutta sisällytetty tulosten tulkintaa varten yhteiseksi työvaiheeksi.
- **Raivaus:** Hakkuutyötä haittaavan alikasvoksen poistaminen joko hakkuulaitteella kaatamalla tai painelemalla.
- **Apu aika:** Työvaihe sisältää hakkuutähteiden ja puutavarapölkkyjen järjestelyä prosessoinnin ulkopuolella sekä työn suunnittelua, joka ilmenee koneen ja hakkuulaitteen paikallaan olona.
- **Keskeytykset:** Työvaiheet, jotka eivät kuulu teholliseen työaikaan ja aiheuttavat hakkuutyön keskeytyksen (esim. konerikko tai huoltotyö, kuten teräketjun vaihto)

Työvaiheluokittelussa on erityisen tärkeää määrittää perusteet työvaiheiden alkamis- ja päättymishetkille tarkasti, ettei työvaihemäärittelyyn jää liikaa tulkinnanvaraa. Tulosten

vertailukelpoisuuden mahdollistamiseksi tässä tutkimuksessa käytetty työvaihejaottelu vastaa monissa aikaisemmin toteutetuissa hakkuutyön aika- ja tuottavuustutkimuksissa käytettyä työvaihejaottelua. Esimerkiksi Nurminen ym. (2006) ja Palander ym. (2013) ovat käyttäneet tutkimuksissaan lähes identtistä työvaiheluokitusta.

2.5.2 Aikatutkimusaineiston analysointi

Runkokohtaisesti määritettyihin työvaiheaikoihin kohdennettiin hakkuukoneen mittamat käsiteltyjen runkojen tilavuustiedot, jotta hakkuutyön ajanmenekkiä pystyttiin tarkastelemaan rungon tilavuuden suhteen. Taulukkomuotoista ajanmenekkiaineistoa käsiteltiin Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmalla ja IBM SPSS -tilasto-ohjelmalla. Videoiden perusteella kelloitetut ajanmenekkiaineistot luokiteltiin kuljettajittain käytettyjen käsittelyleveyksien mukaan. Kelloitettua ajanmenekkiaineistoa ja kaistalehakkuuleveyksien eroja tarkasteltiin ensin yksittäisten työvaiheiden ajanmenekkien perusteella ja työvaihekohtaisen tarkastelun jälkeen vertailu suoritettiin runkokohtaisen tehoajanmenekin sekä tuottavuustason osalta. Työvaiheista siirtyminen, hakkuulaitteen vienti sekä kaato ja tuonti olivat työvaiheita, joiden ajanmenekin oletettiin ennakolta eroavan kaistalehakkuun käsittelyleveyksien välillä, joten työvaihekohtaisissa tarkasteluissa kiinnitettiin erityisesti huomiota kyseisiin työvaiheisiin.

Tilastollisten menetelmien valitsemiseksi ajanmenekkiaineistolle suoritettiin kuljettaja-kohtaisesti Kolmogorov-Smirnov ja Shapiro-Wilk -testit, joilla testattiin aineiston normaalijakautuneisuutta. Ajanmenekkiaineiston ei todettu noudattavan normaalijakaumaa yhdenkään kuljettajan eikä työvaiheen osalta, joten tilastollista tarkastelua varten päätettiin hyödyntää ei-parametrisia menetelmiä. Kruskal-Wallis -testi osoittautui sopivaksi ei-parametriseksi menetelmäksi työvaihekohtaisten ajanmenekkierojen tilastollisen merkitsevyyden selvittämiseen käsittelyleveyksien välillä. Kruskal-Wallis -testi soveltuu useamman kuin kahden riippumattoman otoksen vertailuun. Tässä tutkimuksessa vertailtavia kaistaleveyksiä oli kolme. Hakkuutyön aikatutkimuksissa Kruskal-Wallis -testiä on aikaisemmin hyödyntänyt esimerkiksi Kärhä ym. (2019) tyvilahojen kuusien katkontavaihtoehtojen vertailussa. Riippumattomien otosten vertailuun soveltuvien testien lisäksi työvaiheita, joiden ajanmenekki oli riippuvainen rungon koosta, tarkasteltiin regressiomalleilla ja valemuuttujatekniikkaa (dummy-tekniikka) hyödyntäen. Kaikissa analyyseissä käytettiin 5 %:n merkitsevyystasoa.

Kellotetuista työvaiheista hakkulaitteen vienti puulle, kaato ja tuonti sekä prosessointi ovat työvaiheita, jotka ilmenevät jokaisen rungon käsittelyn yhteydessä. Näiden työvaiheiden osalta tarkasteltiin ensin työvaiheen ajanmenekin ja rungon koon riippuvuutta. Riippuvuutta tarkasteltiin Pearsonin korrelaatiokertoimen avulla. Kaadon ja tuonnin sekä prosessoinnin ajanmenekin todettiin korreloivan tilastollisesti merkitsevästi (p -arvo $< 0,05$) mäntyrunkojen koon kanssa kaikilla kuljettajien ja kaistaleveyksien yhdistelmillä. Näiden kahden työvaiheen osalta päätettiin luoda kuljettajakohtaiset regressiomallit ja hyödyntää valemuuttujatekniikka käsittelyleveyksien ajanmenekkierojen selvittämisessä. Kuljettajakohtaisissa lineaarisissa regressiomalleissa tarkasteltavan työvaiheen ajanmenekkiä selitettiin rungon koolla. Valemuuttujamalleissa vertailtavat käsittelyleveydet noudattavat samaa perusyhtälöä (sama kulmakerroin) ja valemuuttujiksi asetettujen käsittelyleveyksien avulla saadaan selvitettyä tasoerot käsittelyleveyksien välillä. Valemuuttujamalleissa yksi käsittelyleveyksistä asetettiin perustasoksi, johon muita leveyksiä verrattiin. Tässä tutkimuksessa valemuuttujamallien käyttö oli perusteltua, koska kuljettajittain rungon koon ja mallinnettavien työvaiheiden riippuvuussuhteen todettiin olevan samansuuntainen eri käsittelyleveyksillä. Valemuuttujatekniikkaa on hyödynnetty monissa hakkuutyön aika- ja tuottavuustutkimuksissa, joiden tavoitteena on ollut vertailla erilaisia hakkuumenetelmiä tai koneita (esim. Sirén & Tantt 2001, Ovaskainen 2012, Vahtila 2019)

Hakkuulaitteen viennin ja muiden rungon koosta riippumattomien sekä koealoittain runkokokohtaisena keskiarvona määritettyjen (s /runko) työvaiheiden ajanmenekkieroja käsittelyleveyksien välillä tarkasteltiin Kruskal-Wallis -testiä hyödyntäen. Kruskal-Wallis -testeissä nollahypoteesina oli, että tarkasteltavan työvaiheen runkokohtainen ajanmenekki on sama kaikilla käsittelyleveyksillä. Vaihtoehtoinen hypoteesi oli, että ainakin kahden käsittelyleveyden välillä on merkitsevä ero tarkasteltavan työvaiheen runkokokohtaisessa ajanmenekissä. Jos testisuureen p -arvo oli alle 0,05, nollahypoteesi hylättiin ja työvaiheen ajanmenekin osalta todettiin olevan tilastollisesti merkitsevää eroa ainakin kahden kaistaleveyden välillä. Kruskal-Wallis -testin parittaisilla vertailuilla tarkannettiin vielä käsittelyleveydet, jotka erosivat tilastollisesti merkitsevästi toisistaan.

2.5.3 Tehoajanmenekin ja tehotuntituottavuuden laskenta

Kaistalehakkuun työvaihekohtaisen tarkastelun jälkeen aineistosta laskettiin jokaiselle rungolle runkokohtainen tehoajanmenekki. Runkokohtainen tehoajanmenekki laskettiin työvaiheaikojen summana kaavan 1 mukaisesti.

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 \quad (1)$$

jossa

T = Hakkuutyön runkokohtainen tehoajanmenekki, s/runko

t_1 = Siirtymisen ajanmenekki, s/runko

t_2 = Hakkuulaitteen viennin ajanmenekki, s/runko

t_3 = Kaadon ja tuonnin ajanmenekki, s/runko

t_4 = Rungon prosessoinnin ajanmenekki, s/runko

t_5 = Hakkuulaitteen ja latvan tuonti eteen, s/runko

t_6 = Raivauksen ajanmenekki, s/runko

t_7 = Apuajat, s/runko

Runkokohtaisen tehoajanmenekin laskennassa kaadon ja tuonnin sekä rungon prosessoinnin ajanmenekit laskettiin kellotettujen runkokohtaisten ajanmenekkien perusteella, koska kyseiset työvaiheet ilmenevät jokaisen rungon käsittelyn yhteydessä ja työvaiheiden ajanmenekit olivat rungon koosta riippuvaisia. Hakkuulaitteen vienti esiintyi myös jokaisen rungon käsittelyssä, mutta työvaihe ei ollut riippuvainen rungon koosta, joten työvaihe laskettiin rungoittain koealakohtaisena keskiarvona (s/runko). Muut työvaiheet, jotka eivät esiintyneet jokaisen rungon käsittelyn yhteydessä, määritettiin koealoittain keskiarvoina (s/runko) työvaiheen ajanmenekin ja käsiteltyjen runkojen määrän perusteella. Työvaiheista raivauksen ajanmenekki päätettiin vakioda kuljettajatasolla kaikilla käsittelyleveyksillä samaksi keskiarvoajaksi, koska koealoja ei oltu ennakkoraivattu ja alikasvoksen vaikutus käsittelyleveyksien vertailussa haluttiin häivyttää. Käsittelyleveyden ei todettu vaikuttavan raivauksen ajanmenekkiin, joten ainoa raivauksen ajanmenekkiä selittävä tekijä oli alikasvoksen määrä ja laatu, mikä vaihteli koealojen välillä.

Käsittelyleveyksien tehoajanmenekin vertailemisen lisäksi ajanmenekkiaineiston perusteella tarkasteltiin yksittäisten työvaiheiden suhteellisia osuuksia (%) tehoajanmenekistä. Työvaiheiden suhteellisten osuuksien määrittämisellä saatiin selville, kuinka kaistalehakkuutyön ajanmenekki jakautuu työvaiheisiin eri käsittelyleveyksillä ja samalla pystyttiin aikaisempien tutkimusten perusteella vertailemaan, kuinka kaistalehakkuun ajanmenekkirakenne suhteutuu muihin hakkuumenetelmiin.

Tehoajanmenekin ja rungon koon perusteella määritettiin tehotuntuottavuus rungoittain kaavan 2 mukaisesti.

$$P = (x / T) \times 3600 \quad (2)$$

jossa

$P = \text{Tehotuntuottavuus, m}^3/\text{h}$

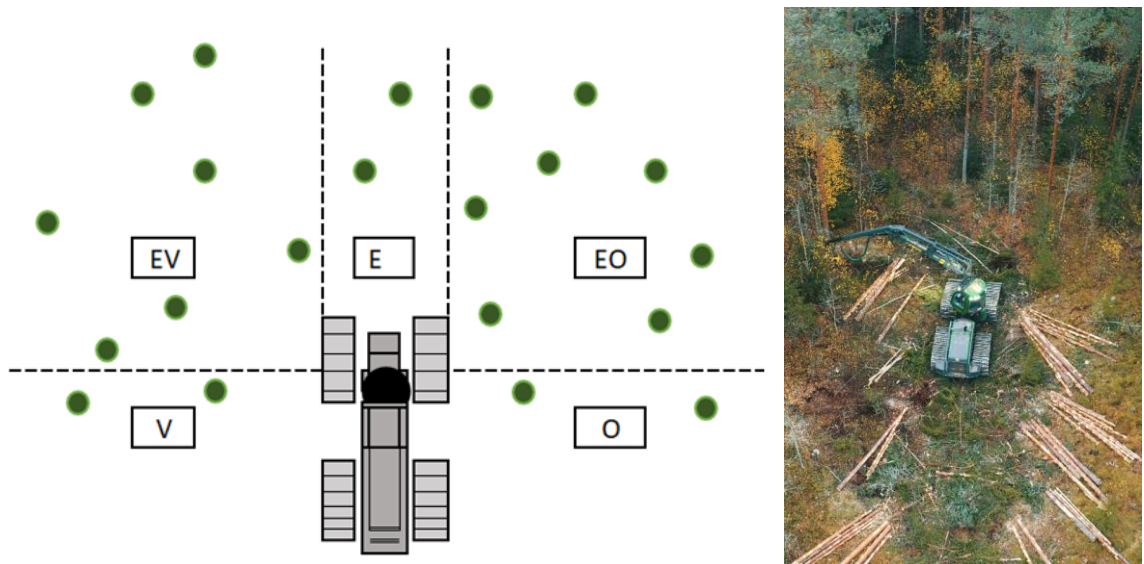
$x = \text{Rungon koko, m}^3$

$T = \text{Hakkuutyön runkokohtainen tehoajanmenekki, s/runko}$

Aineistosta luotiin kuljettajakohtaisesti tehotuntuottavuusmallit, joissa hakkuutyön tuottavuutta (m^3/h) selitetään käsiteltävän rungon koolla (m^3). Rungon koon ja tehotuntuottavuuden riippuvuus mallinnettiin polynomisella regressiomallilla käsittelyleveyttä valemuuttujana hyödyntäen. Mallinnuksessa käytettiin polynomista regressiomallia, koska kuljettajakohtaisten mallien selitysteiden (R^2) todettiin selittävän aineistossa tuottavuutta parhaiten. Mallien perusteella tehotuntuottavuutta vertailtiin käsittelyleveyksittäin samalla rungon järeydellä aineiston keskimääräistä mäntyrungon kokoa ($0,365 \text{ m}^3$) hyödyntäen.

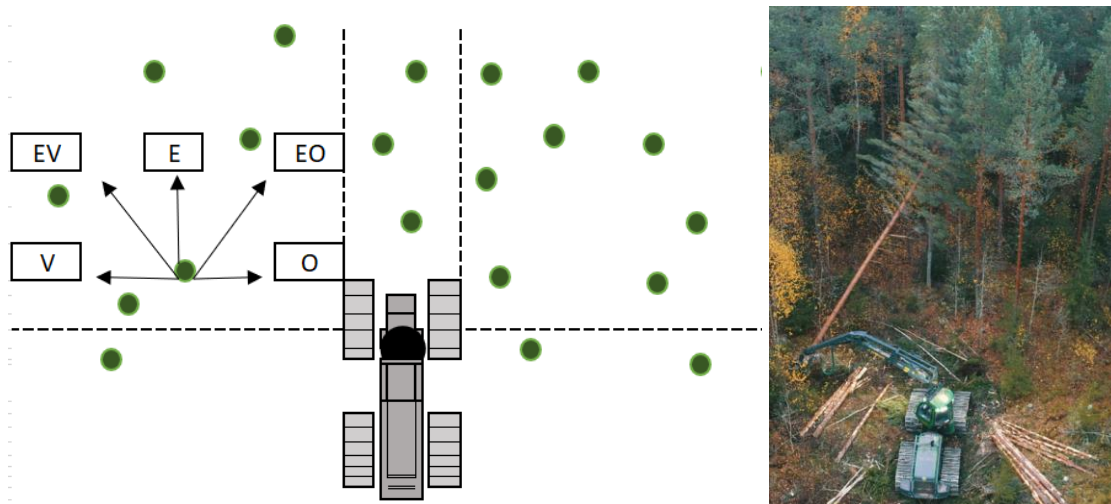
2.5.4 Kaistalehakkuun työtekniikan määrittäminen

Tutkimuksessa mukana olleet kuljettajat ohjeistettiin suorittamaan kaistalehakkuukoealat itselleen tutuimmalla ja parhaaksi kokemallaan menettelyllä, koska ennakolta ei ollut tietoa siitä, miten hakkuutyö kaistalehakkuussa kannattaa toteuttaa. Kuljettajien työskentelyä eri käsittelyleveyksillä tarkasteltiin videoaineiston perusteella työvaihekellotuksen yhteydessä. Jokaisen kaadettavan rungon osalta kirjattiin rungon sijainti, kaatosuuntaa sekä kasaosuus. Kaadettavan rungon sijainti suhteessa hakkuukoneeseen kirjattiin kuvan 8 mukaisesti. Hakkuukoneen työskentelyalue jaettiin viiteen lohkoon ja rungon sijainniksi kaadettaessa kirjattiin joku seuraavista: vasemmalla, etuvasemmalla, edessä, etuoikealla tai oikealla.



Kuva 8. Kaadettavan rungon sijainnin määrittämisessä käytetyt lohkot. V = vasen, EV = etuvasen, E = edessä, EO = etuoikea, O = oikea. Oikealla on havainnollistava kuva hakkuulaitteen viennistä kaadettavalle runkolle Kouvolan koeleimikolla.

Kaadettavan rungon sijainnin määrittämisen jälkeen rungon kaatosuunta kirjattiin kuvan 9 mukaisesti. Rungon kaatosuunta kirjattiin suhteessa hakkuukoneeseen ja suunnaksi kirjattiin joku seuraavista: vasemmalle, etuvasemmalle, eteenpäin, etuoikealle tai oikealle. Kaatosuunnan määrittämisessä kukin suunta vastasi noin 40 asteen sektoria. Aineistossa puiden kaatosuuntaa taaksepäin ei esiintynyt, joten tämän suunnan osalta ei tehty kirjauksia.



Kuva 9. Rungon kaatosuunnan määrittämisessä käytetyt suunnat. V = vasemmalle, EV = etuvasemmalle, E = eteenpäin, EO = etuoikealle, O = oikealle. Oikealla on havainnollistava kuva kaadon suuntauksesta Kouvolan koeleimikolla.

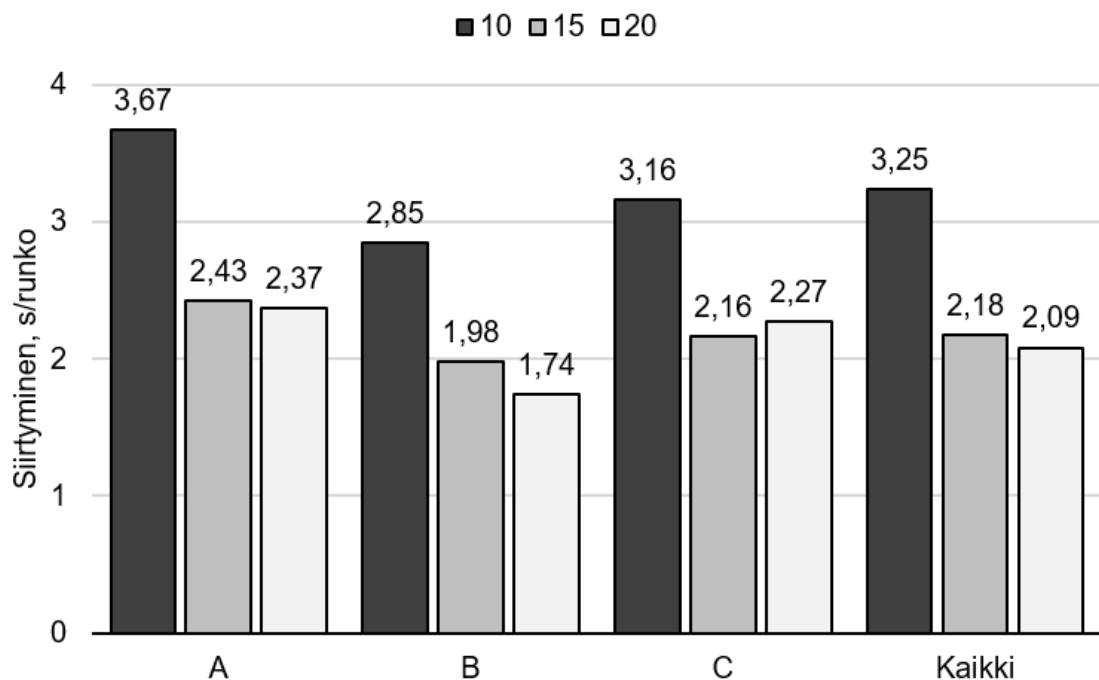
Kaadettavan rungon sijainnin ja kaatosuunnan lisäksi jokaisen rungon osalta kirjattiin rungon kasaustuoli. Kasaustuolen osalta käytettiin luokitusta oikea ja vasen. Edellä esitettyjen kaistalehakkuun työtekniikkaa kuvaavien havaintojen perusteella laskettiin kuljettajittain prosenttiosuudet kaatosijainneille, kaatosuunnille ja kasaustuolille käsittelyleveysittain. Aineiston perusteella tarkasteltiin kuinka kaistalehakkuun käsittelyleveys vaikuttaa kaadettavien runkojen kaatosijaintiin ja hakkuukoneenkuljettajan käyttämään kaatosuuntaukseen.

3 TULOKSET

3.1 Kaistalehakkuun työvaiheet

3.1.1 Siirtyminen

Siirtymisen ajanmenekkiä tarkasteltiin koealoittain laskettujen runkokohtaisten keskiarvojen perusteella (s/runko). Siirtymisen runkokohtainen ajanmenekki oli 10 m leveällä käsittelykaistaleella kaikilla kuljettajilla muita leveyksiä suurempi (kuva 10). Koko aineiston perusteella 10 m leveän kaistaleen runkokohtainen siirtymisaika oli keskimäärin 49 % suurempi ja 20 m leveän 4 % pienempi kuin 15 m leveällä kaistaleella. Kruskall-Wallis -testin perusteella 10 m leveän kaistaleen runkokohtainen siirtymisaika erosi tilastollisesti merkitsevästi muista leveyksistä kuljettajilla A ja B (A: $\chi^2 = 28,3$; $p < 0,001$, B: $\chi^2 = 35,8$; $p < 0,001$). Siirtymisen runkokohtainen ajanmenekki erosi 15 ja 20 metriä leveiden kaistaleiden välillä vain vähän, eikä ero ollut Kruskall-Wallis -testin parittaisten vertailujen perusteella tilastollisesti merkitsevä yhdenkään kuljettajan osalta.



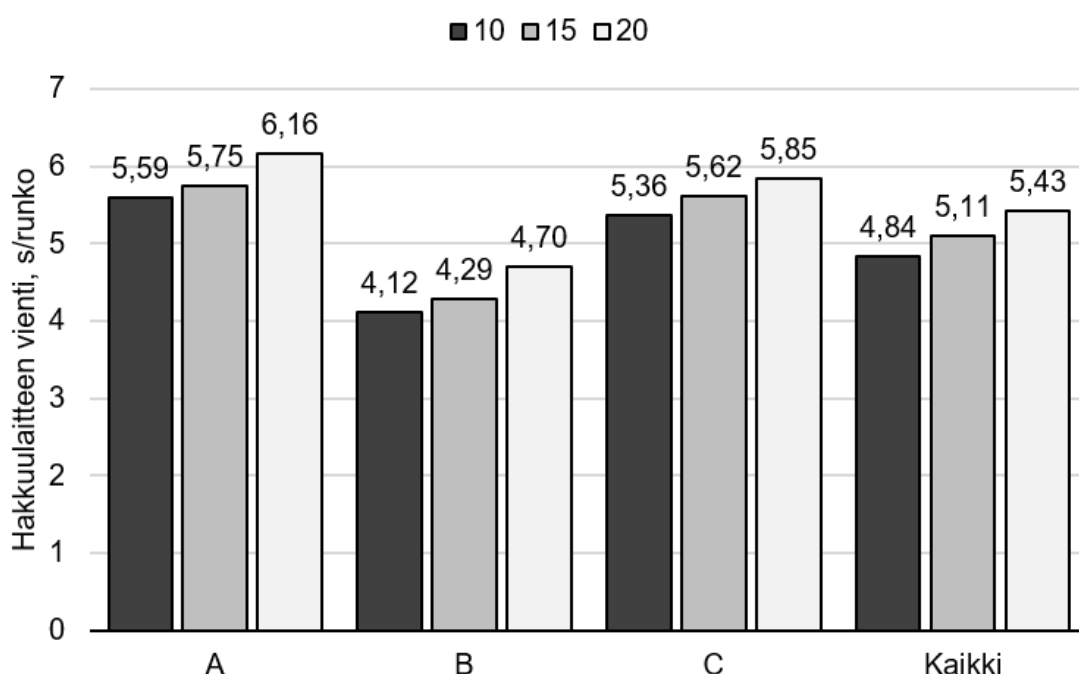
Kuva 10. Siirtymisen runkokohtainen ajanmenekki kaistalehakuksessa käsittelyleveyksittäin ja kuljettajittain.

Hakkuutyön aikatutkimuksissa siirtymisen runkokohtaisen ajanmenekin on todettu riippuvan kohteen puuston tiheydestä (esim. Kuitto ym. 1994, Kärhä ym. 2006). Tämän tutkimuksen koealoilla puuston hehtaarikohtaisessa runkoluvussa oli vain vähän vaihtelua. Keskimäärin koealoille laskettu hehtaarikohtainen runkoluku oli 536 r/ha ja keskihajonta

102 r/ha. Vähäisestä runkoluvun vaihtelusta johtuen koealakohtaisen runkoluvun ja siirtymisen ajanmenekin välistä riippuvuussuhdetta ei lähdetty tarkemmin mallintamaan ja tarkastelu tehtiin pelkkien keskiarvoaikojen perusteella. Koko aineistossa siirtymäajasta 96 % oli eteenpäin ajoa ja 4 % taaksepäin ajoa. Käsittelyleveyksien välillä eteenpäin ja taaksepäin ajon osuudessa ei ollut suurta eroa. 10 ja 15 metriä leveillä käsittelykaistaleilla eteenpäin ajon osuus oli 98 % ja taaksepäin ajon 2 %. 20 metriä leveällä kaistaleella vastaavat prosenttiosuudet olivat 94 % ja 6 %.

3.1.2 Hakkuulaitteen vienti puulle

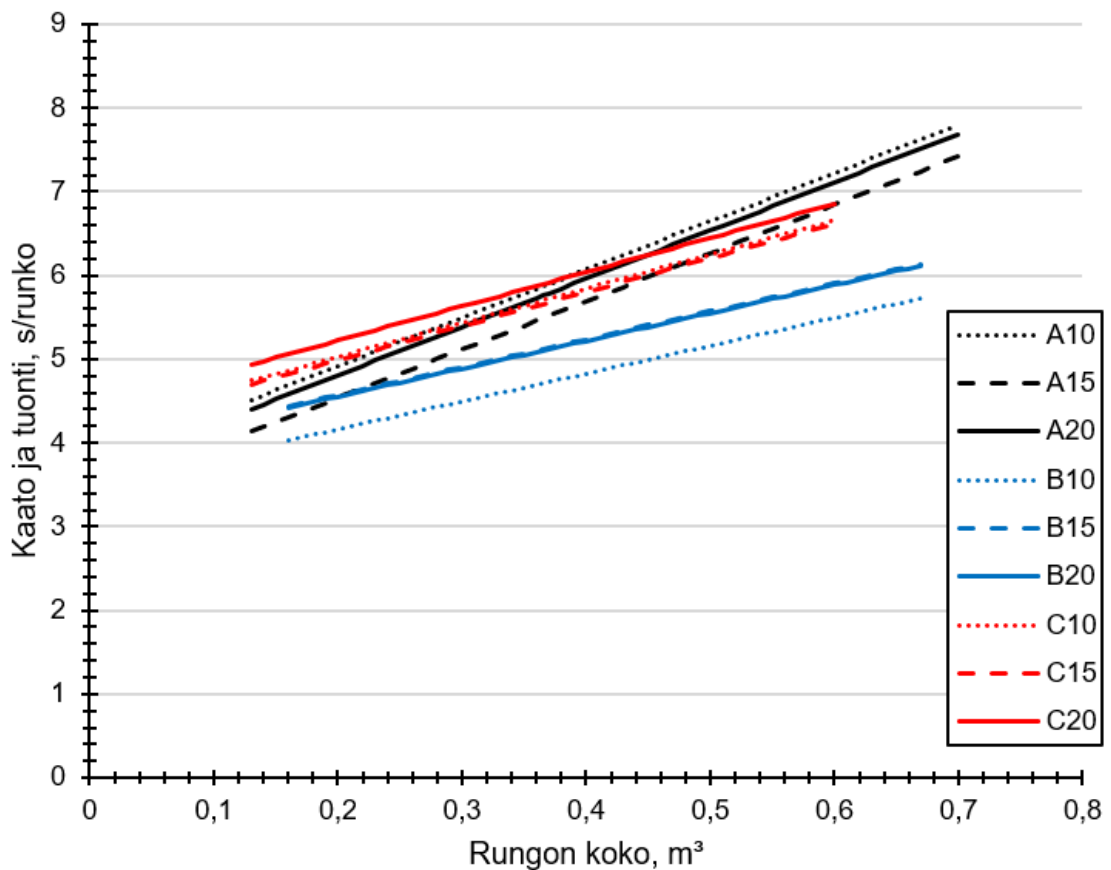
Hakkuulaitteen viennin runkokohtainen ajanmenekki oli kaikilla kuljettajilla suurin käsittelyleveydellä 20 m ja pienin leveydellä 10 m (kuva 11). Koko aineistossa 10 m leveän kaistaleen runkokohtainen hakkuulaitteen vientiaika oli 5 % pienempi ja 20 m leveän 6 % suurempi kuin 15 m leveällä kaistaleella. Kruskal-Wallis -testin perusteella kuljettajilla A ja B kouran viennin ajanmenekki erosi käsittelyleveyksien välillä tilastollisesti merkitsevästi (A: $\chi^2 = 17,06$; $p < 0,001$, B: $\chi^2 = 44,2$; $p < 0,001$). Kuljettajan C osalta käsittelyleveyksien erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä 5 %:n merkitsevyystasolla.



Kuva 11. Hakkuulaitteen viennin runkokohtainen ajanmenekki kaistalehakkuussa käsittelyleveysittäin ja kuljettajittain.

3.1.3 Kaato ja tuonti

Kaato ja tuonti -työvaiheen ajanmenekki korreloi käsiteltävän rungon koon kanssa tilastollisesti merkitsevästi ($p < 0,05$) kaikilla kuljettajien ja käsittelyleveyksien yhdistelmillä. Rungon koon ja kaato ja tuonti -työvaiheen riippuvuussuhteen takia käsittelyleveyksien eroja tarkasteltiin lineaaristen valemuuttujamallien avulla kuljettajittain mäntyrunkojen osalta. Valemuuttujamalleissa 20 m leveä käsittelykaistale asetettiin perustasoksi, johon 15 m ja 10 m leveitä kaistaleita verrattiin. Kaato ja tuonti -työvaiheen kuljettajakohtaiset mallit on esitetty kuvassa 12 ja yhtälöt taulukossa 3.



Kuva 12. Rungon koon vaikutus kaato ja tuonti -työvaiheen ajanmenekkiin kuljettajittain eri käsittelyleveyksillä. Kuvaajien yhtälöt on esitetty taulukossa 3.

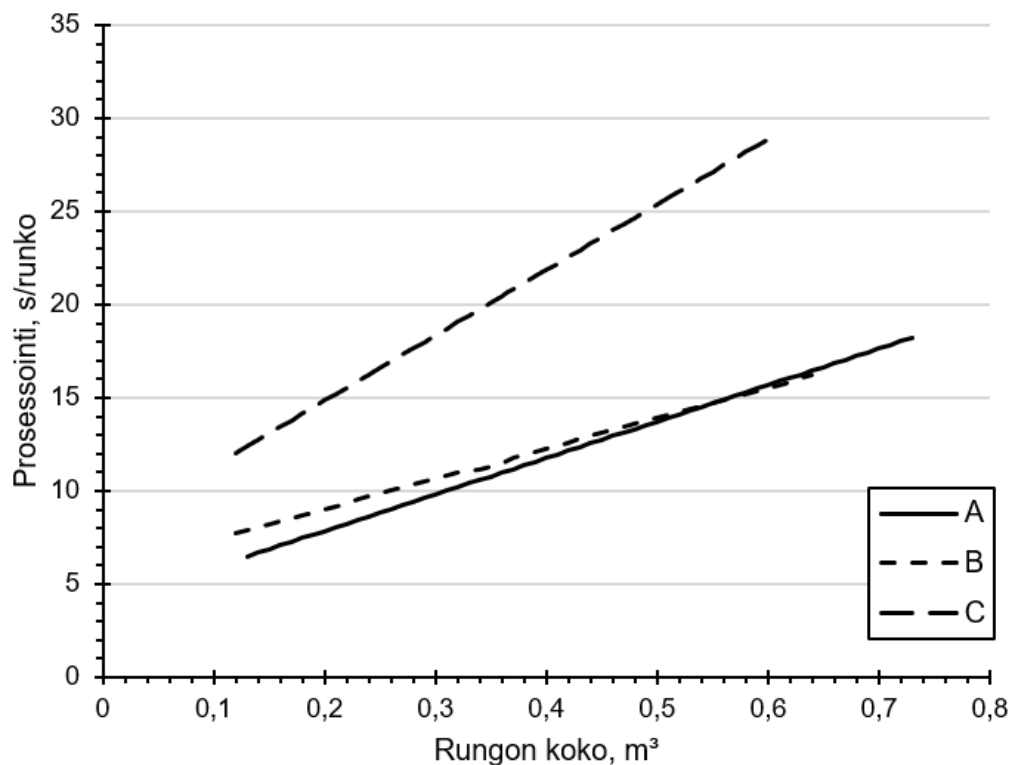
Taulukko 3. Kaato ja tuonti -työvaiheen runkokohtaista ajanmenekkiä kuvaavat valemuuttujamallit kuljettajittain. Malleissa perustasoksi on asetettu käsittelyleveys 20 m (valemuuttujan kerroin 0).

$y = a + bx + c_1k_1 + c_2k_2$ missä y = kaadon ja tuonnin runkokohtainen ajanmenekki, s x = rungon koko, m ³ k_1 = valemuuttuja=1, jos käsittelyleveys on 15 metriä, muulloin 0 k_2 = valemuuttuja=1, jos käsittelyleveys on 10 metriä, muulloin 0 a = vakio b, c_1, c_2 = muuttujien kertoimet							
	n	Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	t-arvo	p-arvo	R ²
A	1103	a	3,655	0,120	30,585	0,000	0,354
		b	5,764	0,237	24,342	0,000	
		c ₁	-0,269	0,107	-2,509	0,012	
		c ₂	0,110	0,129	0,852	0,395	
B	1350	a	3,888	0,098	39,661	0,000	0,191
		b	3,327	0,200	16,642	0,000	
		c ₁	0,019	0,073	0,260	0,795	
		c ₂	-0,391	0,086	-4,527	0,000	
C	583	a	4,407	0,283	15,570	0,000	0,059
		b	4,082	0,699	5,843	0,000	
		c ₁	-0,238	0,232	-1,029	0,304	
		c ₂	-0,196	0,336	-0,582	0,561	

Käsittelyleveydellä ei todettu olevan kuljettajatasolla suurta vaikutusta kaato ja tuonti -työvaiheen ajanmenekkiin. Taulukossa 3 muuttujien c₁ (15 m) ja c₂ (10 m) kertoimien estimaatit kertovat kuinka paljon runkokohtainen ajanmenekki eroaa 20 m leveän käsittelykaistaleen kaato ja tuonti -työvaiheen ajanmenekistä. Käsittelyleveyksien ajanmenekkierot ovat kaikilla kuljettajilla alle 0,5 sekuntia. Mallin mukaan kuljettajan A osalta 15 m leveän kaistaleen kaato ja tuonti -työvaiheen ajanmenekki oli tilastollisesti merkitsevästi pienempi kuin perustasoksi asetetulla 20 m leveällä kaistaleella (muuttujan c₁ p-arvo < 0,05). Samoin kuljettajan B osalta 10 m leveä kaistale erosi tilastollisesti merkitsevästi perustasosta 20 m (muuttujan c₂ p-arvo < 0,05). Muutamista tilastollisesti merkitsevistä eroista huolimatta kaato ja tuonti -työvaiheen ajanmenekkierot olivat käsittelyleveyksien välillä varsin pieniä, eikä ajanmenekkierot käsittelyleveyksien välillä esiintyneet johdonmukaisesti samansuuntaisina eri kuljettajilla.

3.1.4 Prosessointi

Kaato ja tuonti -työvaiheen tapaan prosessoinnin ajanmenekki korreloi käsiteltävän rungon koon kanssa tilastollisesti merkitsevästi ($p < 0,05$) kaikilla kuljettajien ja käsittelyleveyksien yhdistelmillä. Käsittelyleveyksien eroja prosessoinnin ajanmenekissä tarkasteltiin myös lineaaristen valemuuttujamallien avulla kuljettajittain. Käsittelyleveydellä ei todettu olevan tilastollisesti merkitsevää vaikutusta prosessoinnin ajanmenekkiin yhdenkään kuljettajan osalta (taulukko 4, muuttujien c_1 ja c_2 p-arvot $< 0,05$). Käsittelyleveyksien aiheuttamat kuljettajakohtaiset tasoerot prosessoinnin ajanmenekissä olivat pieniä, joten kuvassa 13 on esitetty vain perustasoksi määritetyn 20 m leveän kaistaleen kuljettajakohtaiset prosessoinnin ajanmenekkimallit. Prosessoinnin ajanmenekin tarkastelussa huomionarvoista oli, että Sievissä työskennelleen kuljettaja C:n ajanmenekki erosi huomattavasti kuljettajista A ja B.



Kuva 13. Rungon koon vaikutus prosessoinnin ajanmenekkiin kuljettajittain 20 metrin käsittelyleveydellä. Kuvaajien yhtälöt on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Prosessoinnin runkokohtaista ajanmenekkiä kuvaavat valemuuttujamallit kuljettajittain. Malleissa perustasoksi on asetettu käsittelyleveys 20 m (valemuuttujan kerroin 0).

$y = a + bx + c_1k_1 + c_2k_2$ missä y = prosessoinnin runkokohtainen ajanmenekki, s x = rungon koko, m ³ k ₁ = valemuuttuja=1, jos käsittelyleveys on 15 metriä, muulloin 0 k ₂ = valemuuttuja=1, jos käsittelyleveys on 10 metriä, muulloin 0 a = vakio b, c ₁ , c ₂ = muuttujien kertoimet							
Kuljettaja	n	Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	t-arvo	p-arvo	R ²
A	1103	a	3,943	0,220	17,912	0,000	0,649
		b	19,566	0,436	44,857	0,000	
		c ₁	-0,376	0,197	-1,906	0,057	
		c ₂	0,330	0,238	1,386	0,166	
B	1350	a	5,133	0,241	21,320	0,000	0,457
		b	16,274	0,491	33,165	0,000	
		c ₁	-0,158	0,181	-0,878	0,380	
		c ₂	-0,108	0,212	-0,508	0,612	
C	583	a	7,842	0,553	14,190	0,000	0,548
		b	35,061	1,364	25,705	0,000	
		c ₁	-0,021	0,453	-0,047	0,962	
		c ₂	-0,023	0,656	-0,035	0,972	

3.1.5 Hakkuulaitteen tai latvan tuonti eteen

Hakkuulaitteen tuonti koneen eteen tai latvan tuonti uralle eivät ajanmenekin osalta eronneet tilastollisesti merkitsevästi käsittelyleveyksien välillä. Kuljettajien välillä oli eroja, mutta kuljettajatasolla käsittelyleveyksien ajanmenekit eivät eronneet toisistaan. Koko aineistossa työvaiheen ajanmenekki oli 10 m kaistaleella 2,6 s/runko, 15 m kaistaleella 2,4 s/runko ja 10 m kaistaleella 2,4 s/runko. Tulos oli oletettavissa, koska työvaihe alkoi yleensä prosessoinnin päätyttyä rungon käsittelypaikalta, mikä ei eronnut käsittelyleveysittäin. Koko aineiston osalta päätyövaiheen ajanmenekistä 14 % oli hakkuulaitteen tuontia koneen eteen ja 86 % latvan tuontia uralle. Kaikki kuljettajat pyrkivät havuttamaan hakkuu-uraa mahdollisimman paljon käsiteltävistä puista saatavalla latvusmassalla, koska työskenneltiin kantavuudeltaan heikolla turvemaalla. Lähes jokaisen puun osalta runko prosessoitiin hakkuu-uran päällä niin, että latva karsiutui suoraan uralle tai mikäli näin ei ollut, niin latva tuotiin erikseen uralle.

3.1.6 Raivaus ja apuajat

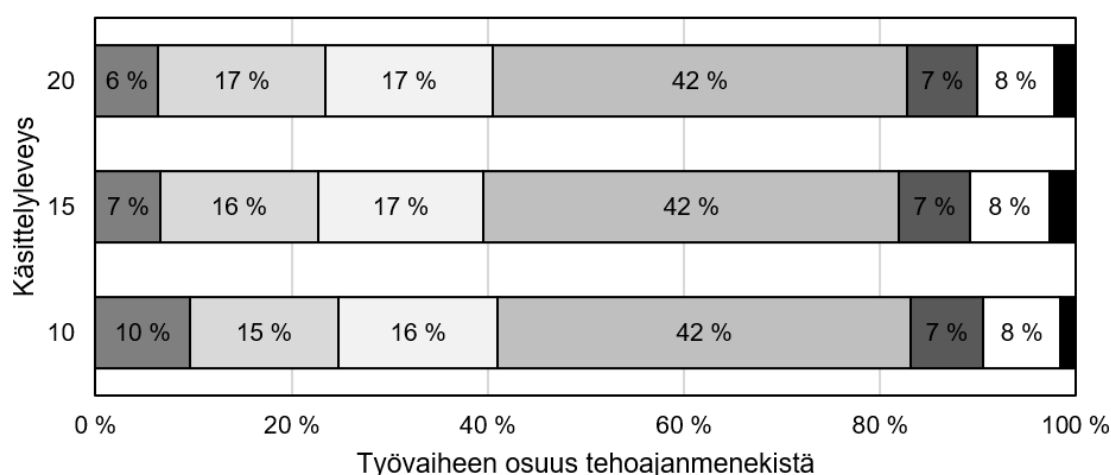
Hakkuutyön aika- ja tuottavuustutkimuksissa optimaalinen tilanne on silloin, kun alikasvosta ei ole tai alikasvoksen määrä on tasainen vertailtavien menetelmien välillä. Tässä tutkimuksessa aineisto kerättiin ennakkoraivaamattomilta koealoilta. Tutkimuskohteilla oli vaihtelua alikasvoksen määrässä, joten alikasvoksen määrä näkyi raivauksen ajanmenekin vaihtelussa niin kuljettajien kuin käsittelyleveyksien välillä. Kuljettajilla raivauksen ajanmenekki ei vaihdellut systemaattisesti samansuuntaisesti käsittelyleveyden mukaan, joten raivauksen ajanmenekin todettiin riippuvan vaihtelevasta alikasvoksen määrästä, eikä käsittelyleveydestä. Tehoajanmenekin ja tuottavuustason laskennassa raivauksen ajanmenekki päätettiin vakioida kuljettajatasolla samaksi. Tällä menettelyllä häivytettiin vaihtelevan alikasvoksen häiriövaikutusta käsittelyleveyksien vertailussa. Kuljettajakohtaisesti kaikkien koealojen perusteella vakioitu runkokohtainen raivausaika oli kuljettajalla A 5,3 s, kuljettajalla B 1,4 s ja kuljettajalla C 1,2 s.

Apuajat pitivät sisällään työn suunnittelua, hakkuutähteiden siirtelyä ja ainespuukasojen järjestelyä muiden työvaiheiden ulkopuolella. Apuaikojen osuus hakkuutyön tehoajanmenekistä oli keskimäärin vain 2 % eikä apuaikojen osalta todettu merkitseviä eroja käsittelyleveyksien välillä yhdelläkään kuljettajista.

3.2 Kaistalehakkuun tehoajanmenekki ja tehotuntuottavuus

Kaistalehakkuun tehoajanmenekin rakenne oli hyvin yhteneväinen eri käsittelyleveyksillä. Yksittäisten työvaiheiden osuudet tehoajanmenekistä koko aineiston osalta on esitetty kuvassa 14. Siirtymisen ja kouran viennin osalta oli havaittavissa eroja työvaiheiden suhteellisissa osuuksissa eri käsittelyleveyksillä. Kapeammilla kaistaleilla siirtymisen suhteellinen osuus on suurempi ja kouran viennin pienempi kuin leveämmillä kaistaleilla.

■ Siirtyminen □ Kouran vienti □ Kaato ja tuonti □ Prosessointi ■ Tuonti eteen □ Raivaus ■ Apuaika



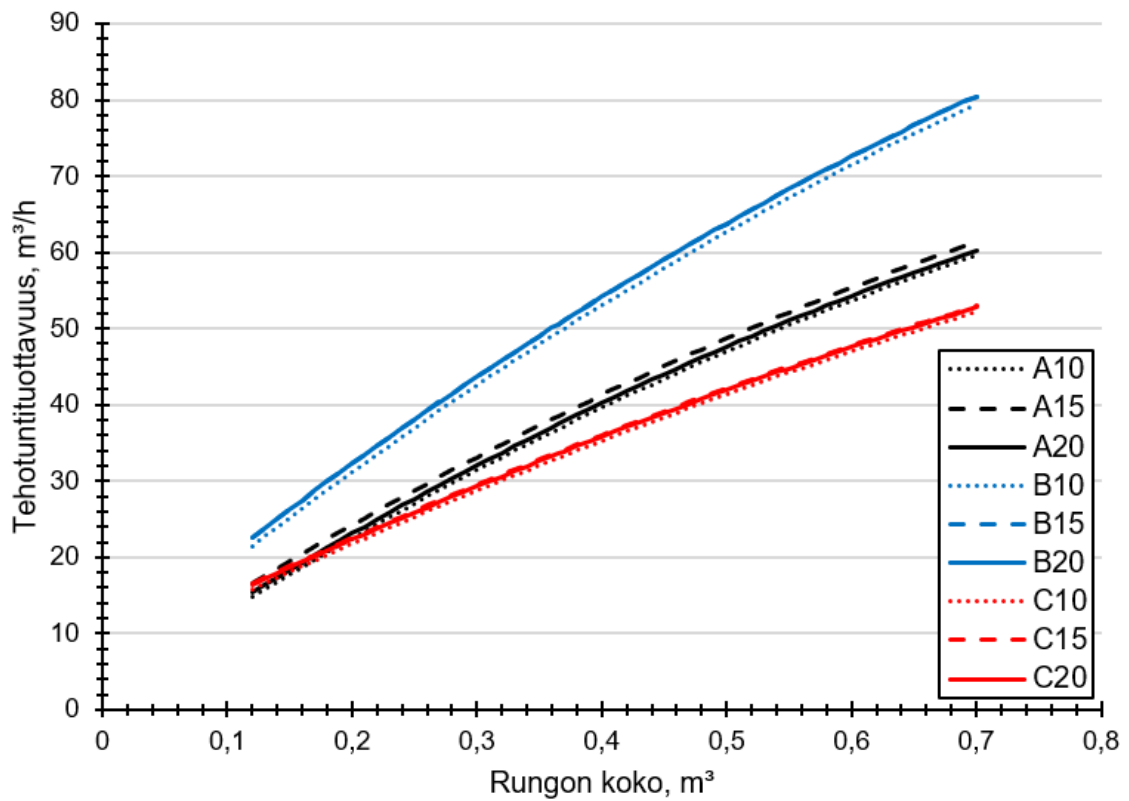
Kuva 14. Tehoajanmenekin rakenne käsittelyleveyksittäin kuljettajakohtaisten keskiarvojen perusteella.

Kuljettajittain ja käsittelyleveyksittäin aineiston mäntyjen keskirungolle 0,365 m³ lasketut ajanmenekit sekä tehoajanmenekki on esitetty taulukossa 5. Kaikilla kuljettajilla 10 m leveän kaistaleen runkokohtainen tehoajanmenekki oli suurin ja 15 m leveän kaistaleen pienin. Käsittelyleveyksien väliset erot tehoajanmenekissä olivat kuljettajasta riippuen 0–1,8 s, mikä vastasi aineiston keskirungolla 0–5 % eroa tehoajanmenekissä. Käsittelyleveyksien erot tehoajanmenekissä johtuivat suurelta osin siirtymisen ja hakkuulaitteen viennin ajanmenekkieroista.

Taulukko 5. Työvaiheiden runkokohtaiset ajanmenekit ja tehoajanmenekki rungon koolla 0,365 m³ kuljettajittain eri käsittelyleveyksillä.

Kuljettaja ja käsittely- leveys		s/runko							
		Siirty- minen	Hak- kuulait- teen vienti	Kaato ja tuonti	Prosessointi	Tuonti eteen	Raivaus	Apu- aika	Tehoajan- menekki
A	10	3,7	5,6	5,9	11,4	3,1	5,3	0,7	35,7
	15	2,4	5,8	5,5	10,7	2,9	5,3	1,3	33,9
	20	2,4	6,2	5,8	11,1	3,2	5,3	1,3	35,2
B	10	2,9	4,1	4,7	11,0	1,7	1,4	0,6	26,4
	15	2,0	4,3	5,1	10,9	1,6	1,4	0,6	25,9
	20	1,7	4,7	5,1	11,1	1,4	1,4	0,5	25,9
C	10	3,2	5,4	5,7	20,6	2,9	1,2	0,2	39,2
	15	2,2	5,6	5,7	20,6	2,6	1,2	0,7	38,6
	20	2,3	5,9	5,9	20,6	2,6	1,2	0,3	38,8
Kaikki	10	3,2	5,0	5,4	14,3	2,6	2,7	0,5	33,7
	15	2,2	5,2	5,4	14,1	2,4	2,7	0,9	32,8
	20	2,1	5,6	5,6	14,3	2,4	2,7	0,7	33,3

Kuljettajakohdaiset tehotuntuottavuuden mallit on esitetty kuvassa 15 ja valemuuttujamallien parametrit taulukossa 6. Työvaihekohtaisista valemuuttujamalleista poiketen tehotuntuottavuudelle luoduissa valemuuttujamalleissa 15 m leveä kaistale asetettiin perustasoksi, mihin 10 m ja 20 m leveiden käsittelykaistaleiden tuottavuutta verrattiin. Tulosten perusteella tuottavuuserot käsittelyleveyksien välillä olivat 0–1,7 m³/h (mallissa kertoimien d₁ ja d₂ estimaatit). Rungon koolla 0,365 m³ käsittelyleveyksien kuljettajakohdaiset tuottavuuserot olivat siten 0–4 %. Käsittelyleveyksien väliset tuottavuuserot olivat tulosten perusteella pieniä ja kuljettajien väliset tuottavuuserot suuria. Kuljettajittain määritettyjen tuottavuusmallien selitysasteiden (R²) perusteella mallit selittivät suuren osan tuottavuustason vaihtelusta (taulukko 6).

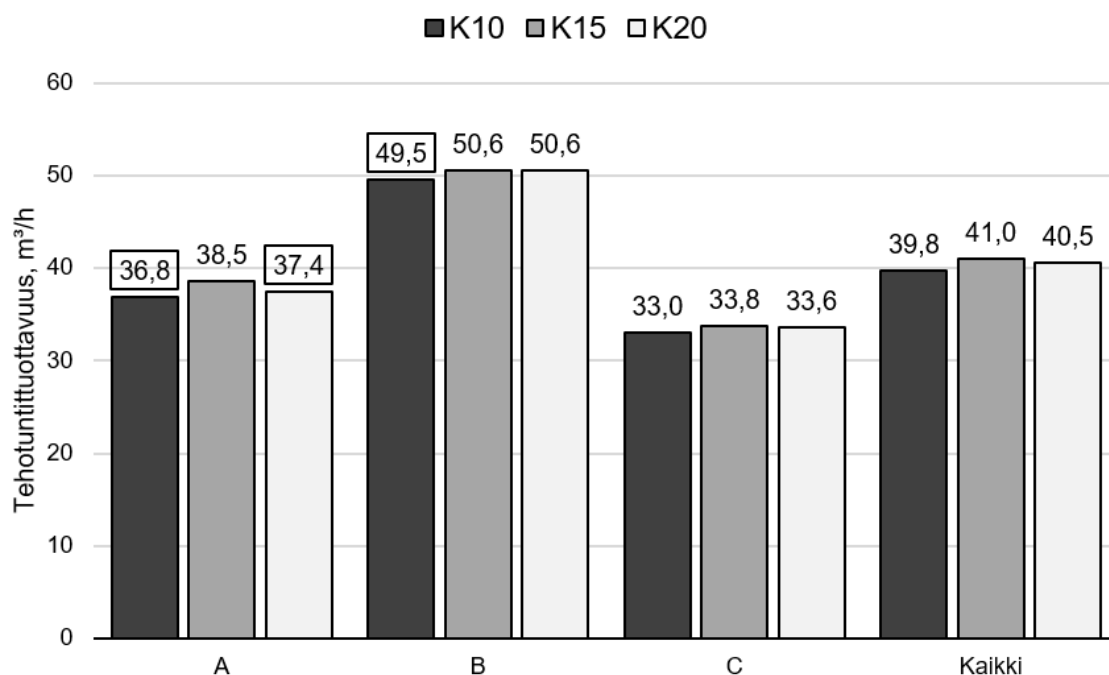


Kuva 15. Kaistalehakuun tehotuntuottavuus rungon koon funktiona kuljettajittain ja käsittelyleveysittäin. Kuvaajien yhtälöt on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Tehotuntituottavuuden kuljettajakohtaiset valemuuttujamallit. Malleissa perustasoksi on asetettu käsittelyleveys 15 m (valemuuttujan kerroin 0).

$y = a + bx + cx^2 + d_1k_1 + d_2k_2$ missä y = Tehotuntituottavuus, m ³ /h x = rungon koko, m ³ k ₁ = valemuuttuja=1, jos käsittelyleveys on 20 metriä, muulloin 0 k ₂ = valemuuttuja=1, jos käsittelyleveys on 10 metriä, muulloin 0 a = vakio b, c, d ₁ , d ₂ = muuttujien kertoimet							
Kuljettaja	n	Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	t-arvo	p-arvo	R ²
A	1103	a	4,064	0,410	9,905	0,000	0,927
		b	108,311	1,646	65,820	0,000	
		c	-37,985	1,482	-25,630	0,000	
		d ₁	-1,109	0,273	-4,057	0,000	
		d ₂	-1,719	0,299	-5,745	0,000	
B	1350	a	7,000	0,761	9,193	0,000	0,877
		b	135,076	3,482	38,792	0,000	
		c	-42,988	3,768	-11,410	0,000	
		d ₁	-0,006	0,372	-0,017	0,986	
		d ₂	-1,097	0,407	-2,694	0,007	
C	583	a	7,210	0,881	8,183	0,000	0,815
		b	81,025	4,594	17,636	0,000	
		c	-22,355	5,703	-3,920	0,000	
		d ₁	-0,214	0,436	-0,491	0,623	
		d ₂	-0,783	0,596	-1,313	0,190	

Kuvassa 16 on havainnollistettu käsittelyleveyksien välisiä tuottavuuseroja tuottavuusmalleista laskettujen tulosten perusteella rungon koolla 0,365 m³. Kuljettajalla A 15 m leveällä kaistaleella työskenneltäessä tuottavuustaso oli tilastollisesti merkitsevästi 4 % suurempi kuin 10 m leveällä kaistaleella ja 3 % suurempi kuin 20 m leveällä kaistaleella. Kuljettajalla B 15 m leveän kaistaleen tuottavuustaso oli sama kuin 20 m leveällä kaistaleella ja tilastollisesti merkitsevästi 2 % suurempi kuin 10 m leveällä kaistaleella. Kuljettajalla C käsittelyleveyksien väliset tuottavuuserot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä, mutta myös kuljettajan C osalta käsittelyleveys 15 m oli tuottavuustasoltaan paras. Kuvassa 16 tehotuntituottavuustaso on laskettu yksittäisten kuljettajien lisäksi koko aineistolle kuljettajien tuottavuustasojen keskiarvona. Koko aineiston perusteella 15 m leveällä kaistaleella tuottavuustaso oli korkeimmillaan. 10 m leveällä kaistaleella hakkuutyön tuottavuus oli keskimäärin 3 % ja 20 m leveällä kaistaleella 1% heikompi kuin 15 m kaistaleella.

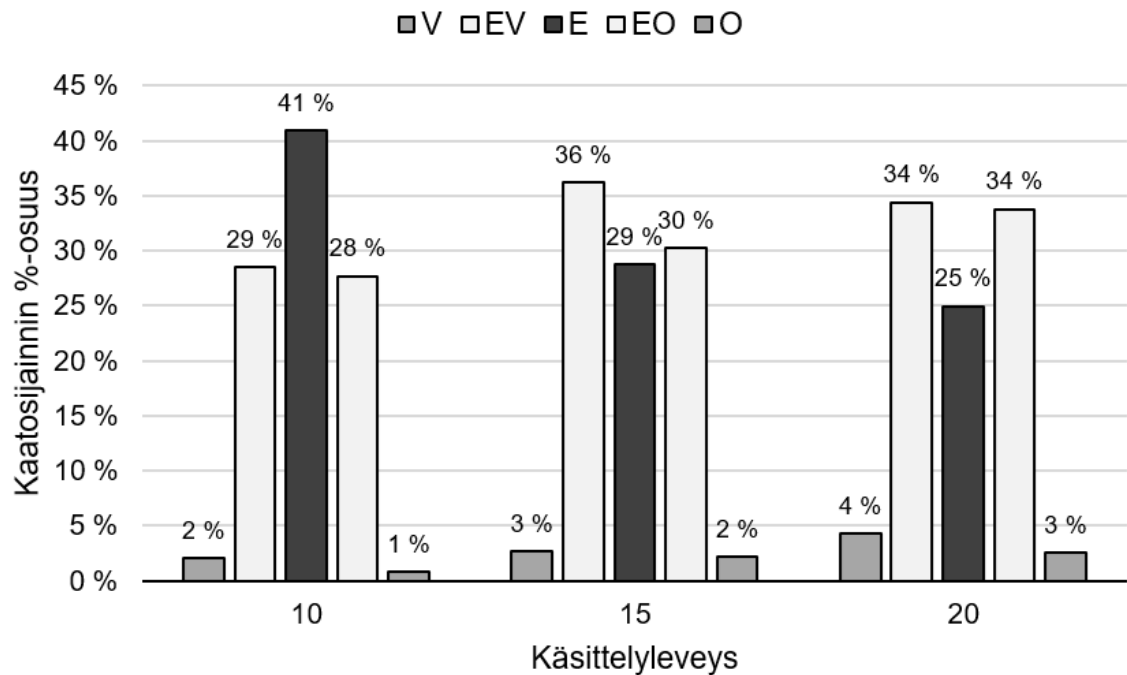


Kuva 16. Tuottavuusmallien perusteella aineiston keskimääräisellä mäntyrungon koolla 0,365 m³ lasketut tuottavuustasot. Laatikoihin merkittyjen käsittelyleveyksien tuottavuusluvut erosivat valemuuttujamallien perusteella tilastollisesti merkitsevästi 15 m leveän kaistaleen tuottavuustasosta.

3.3 Työtekniikka kaistalehakkuussa

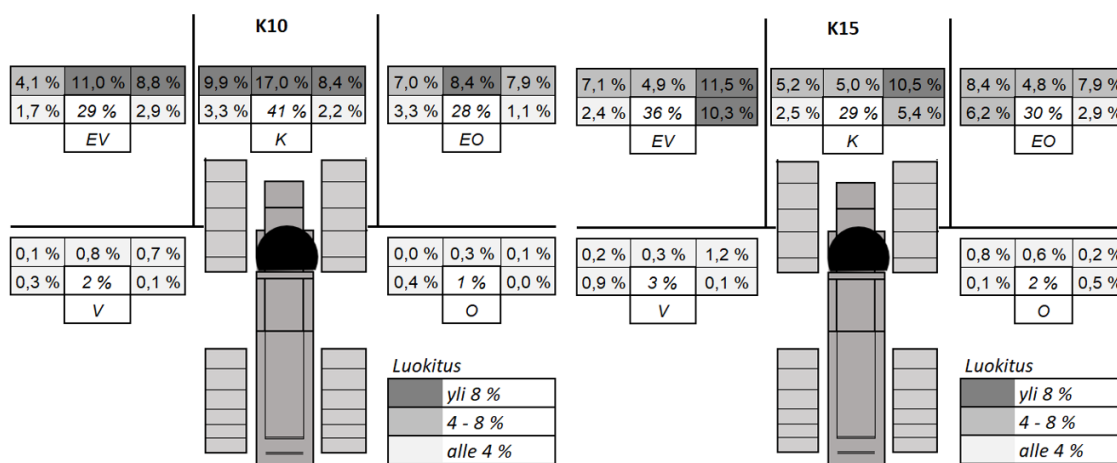
Käsittelyleveyksien välillä oli luonnollisestikin eroa siinä, missä suurin osa kaadettavista puista kaatohtokellä sijaitsi. 10 m leveällä kaistaleella yli 40 % kaadettavista rungoista sijaitsi suoraan hakkuukoneen edessä (kuva 17). 15 m leveällä kaistaleella hakkuukoneen edessä sijaitsi 29 % ja 20 m leveällä kaistaleella enää 25 % kaadettavista rungoista. Käsittelyleveyksillä 10 m ja 20 m kaikki kuljettajat työskentelivät järjestelmällisesti keskellä kaistaletta, joten kaadettavat rungot jakaantuivat tasan etuvasemman ja etuoikean sijainnin osalta. 15 m leveällä kaistaleella kuljettajat eivät kulkeneet täysin kaistaleen keskellä vaan kuljettajittain jompikumpi reuna painottui enemmän, mikä näkyy 15 metriä leveän kaistaleen erisuuruuksina prosenttiosuuksina etuvasemmalta ja etuoikealta kaadettujen runkojen osalta (kuva 17). Koko aineiston perusteella 15 m leveällä kaistaleella ajettiin keskimäärin enemmän kaistaleen oikean reunan puolella. Hakkuukoneen kulkusuuntaan nähden kohtisuoraan vasemmalta (V) ja oikealta (O) kaadettujen puiden määrä oli aineiston perusteella kaikilla leveyksillä alle 10 %. Tuloksista on havaittavissa, että käsittelyleveyden kasvaessa sivuilta kaadettujen runkojen osuus kasvoi hieman. 20 m leveällä

kaistaleella suurin osa vasemmalta tai oikealta kaadetuiksi kirjatuista rungoista oli puomin ääriasennosta sivulta kaadettuja runkoja.



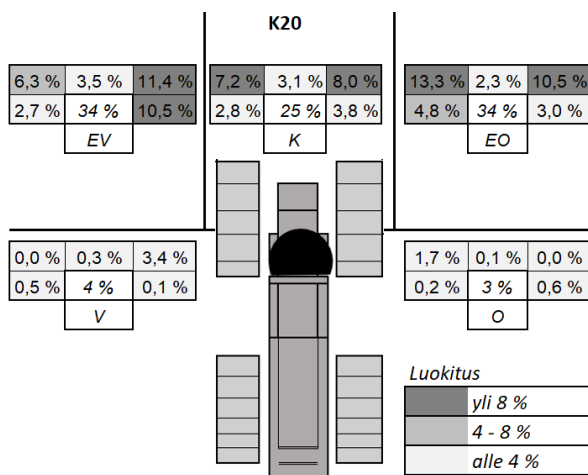
Kuva 17. Koko aineiston perusteella lasketut runkojen kaatosijaintien osuudet hakkuukoneen työalueelta käsittelyleveyksittäin. V = vasen, EV = etuvasen, E = edessä, EO = etuoikea, O = oikea.

Käsittelyleveydet erosivat myös runkojen kaatosuuntauksen osalta toisistaan. 10 metriä leveällä kaistaleella puun kaato suunnattiin lähtökohtaisesti suoraan eteenpäin, jotta välttyttiin vaurioittamasta pystyyn jäävien vieruskaistaleiden puustoa. Kuvassa 18 on havainnollistettu 10 metriä leveän kaistaleen kaatosuuntauksien prosenttiosuuksia koko aineistossa kaatosijainneittain. Kaikissa kaatosijainneissa 10 m leveällä kaistaleella yleisin kaatosuunta oli suoraan eteenpäin hakkuukoneen etenemissuunnan myötäisesti. 15 m ja 20 m leveillä kaistaleilla kaatoja suunnattiin myös suoraan eteenpäin, mutta osuus ei ollut yhtä suuri kuin 10 m leveällä kaistaleella.



Kuva 18. Puiden kaadon suuntaukset kaatosijainneittain 10 m leveiden (vasen kuva) ja 15 m leveiden (oikea kuva) kaistaleiden osalta. Prosenttiosuudet on laskettu koko kaistalehakkuaaineiston perusteella.

15 m ja 20 m leveillä kaistaleilla suurin osa rungoista kaadettiin sektoreista etuvasen (EV) ja etuoikea (EO) ja suunnattiin kohti käsittelykaistaleen keskustaa etuvasemmalle, vasemmalle, etuoikealle tai oikealle riippuen siitä kummalta puolelta konetta runko kaadettiin (kuvat 18 ja 19). Kaikilla leveyksillä suoraan kaistaleen reunaa kohti sivullepäin suunnatut kaadot olivat vähäisiä vaihdellen 0–3,3 % välillä.



Kuva 19. Puiden kaadon suuntaukset kaatosijainneittain 20 m leveiden kaistaleiden osalta. Prosenttiosuudet on laskettu koko kaistalehakkuaaineiston perusteella.

Koko aineiston perusteella 58 % rungoista prosessoitiin hakkuukoneen vasemmalle puolelle ja 42 % oikealle puolelle. Hakkuukoneen edestä kaadettavia runkoja käsiteltiin yhtä paljon kummallekin puolelle hakkuukonetta. Vasemmalta ja etuvasemmalta kaadetuista rungoista 73 % käsiteltiin samalle puolella konetta ja 27 % rungoista tuotiin hakkuu-uran yli koneen oikealle puolelle prosessoitavaksi. Oikealta ja etuoikealta kaadetuista run-

goista vastaavasti 59 % käsiteltiin hakkuukoneen oikealla puolella ja 41 % tuotiin vasemmalle puolelle. Runkojen kasauspuolet eivät suuresti eronneet käsittelyleveyksien välillä, joten tarkempia käsittelyleveyskohtaisia tietoja runkojen kasauspuolesta ei nähty tarpeelliseksi esittää.

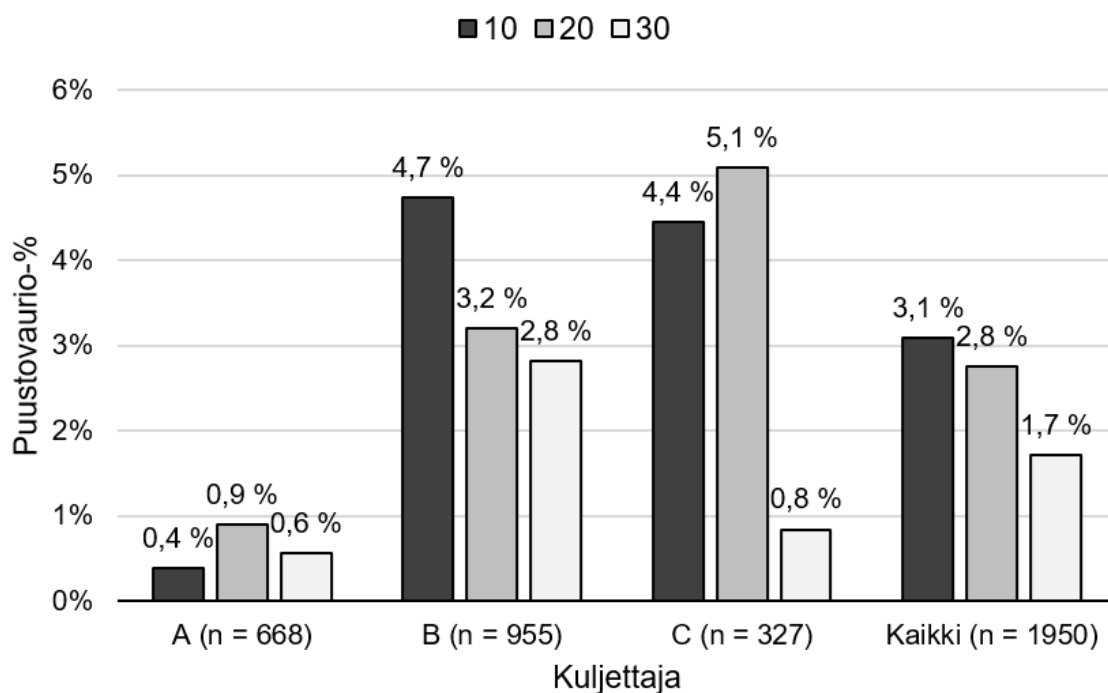
3.4 Puustovauriot kaistalehakkuussa

Kaistalehakkuukoealojen viereen jääviltä pystypuustokaistaleilta mitattiin yhteensä 71 kappaletta kuusi metriä leveitä koko kaistalehakkuukoealan pituisia puustovauriokoealoja. Yhteensä puustovauriokoealojen pinta-ala oli 4,17 ha. Puustovauriokoealojen määrät kuljettajittain on esitetty taulukossa 7. Mitatuilta puustovauriokoealoilta laskettiin yhteensä 1950 runkoa, joista 50 kpl tulkittiin kaistalehakkuun seurauksena vaurioituneiksi. Koko aineistossa puustovaurioita oli 2,6 %.

Taulukko 7. Mitattujen puustovauriokoealojen tiedot kuljettajittain.

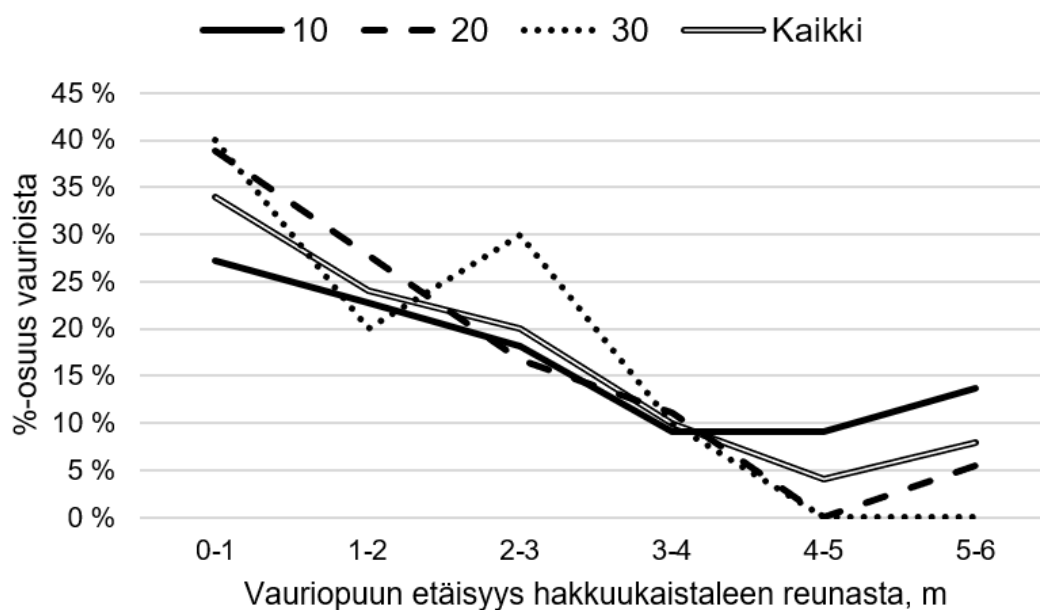
<i>Kuljettaja</i>	<i>Mitatut koealat, kpl</i>	<i>Koealojen pinta-ala yhteensä, ha</i>	<i>Kaikki run- got, kpl</i>	<i>Vaurioituneet rungot, kpl</i>	<i>Puustovaurio-%</i>
A	25	1,53	668	4	0,6 %
B	33	2,04	955	35	3,7 %
C	13	0,60	327	11	3,4 %
Kaikki	71	4,17	1950	50	2,6 %

Kuljettajien työjäljessä oli eroa puustovaurioiden esiintyvyyden osalta. Kuljettajalla A puustovaurioiden osuus oli pienempi kuin kuljettajilla B ja C. Koko aineistosta laskettujen puustovaurioprosenttien perusteella 10 m leveän kaistaleen viereisillä kasvamaan jätetyillä kaistaleilla puustovaurioita oli eniten (3,1 %). 20 metriä leveillä kaistaleilla puustovaurioita oli keskimäärin 2,8 % ja 30 metriä leveäksi hakattujen kaistaleiden vaurioiden määrä oli vastaavasti 1,7 % (kuva 20).



Kuva 20. Puustovaurioprocentit hakkuukaistaleiden vieruspuissa kaistaleleveyksittäin ja kuljettajittain.

Vaurioiden määrän todettiin olevan sitä pienempi mitä kauempana hakkuukaistaleen reunasta oltiin. Kaikilla kaistaleleveyksillä vaurioiden yli 50 % sijaitsi alle kahden metrin etäisyydellä hakkuukaistaleen reunasta (kuva 21). Vaurioiden 98 % oli mäntyjä ja 2 % koivuja. Vaurioiden keskiläpimitta koko aineistossa oli 23,6 cm, mikä oli lähellä kohteiden puuston keskiläpimittaa.



Kuva 21. %-osuus havaituista vaurioiden kaistaleleveyksittäin kaistalehakkuukoealan reunasta mitatun etäisyyden suhteen.

Hakkuun jälkeen suoritettujen puustovaurioinventointien perusteella ei pystytty täydellä varmuudella määrittämään kunkin puustovaurion aiheuttajaa, mutta vaurion sijainnin ja muodon perusteella pystyttiin kuitenkin tekemään valistunut arvio vaurion aiheuttajasta. Puustovaurion aiheuttajan todettiin useimmissa tapauksissa olleen hakkuukaistaleelta kaadettava runko, joka osuessaan kolhaisi vieruskaistaleelle jätettävää puuta. Tyypillisin havaituista vaurioista oli kuvan 22 vasemmanpuoleisen vaurion mukainen rungon raapiutuma useammassa kohdassa runkoa, mutta myös kuvan 22 oikeanpuoleisen tyyppisiä vaurioita rungon tyviosassa havaittiin.



Kuva 22. Tyypillisiä hakkuukaistaleen vieruspuissa havaittuja puustovaurioita.

4 TULOSTEN TARKASTELU

4.1 Aika- ja tuottavuustutkimus

4.1.1 Aikatutkimusaineisto

Tässä tutkimuksessa videoitu ja työvaihekellotettu kaistalehakkuuaineisto yhteensä 3 562 runkoa ja kestoltaan yli 30 tuntia hakkuutyötä on työvaihekohtaisena kelloaikatutkimuksena käytössä olleet resurssit huomioiden kohtalaisen kattava aineisto. Aikaisemmin toteutetuissa empiirissä kelloaikatutkimuksissa hakkuuaineistot ovat olleet esimerkiksi Sirénin ja Tantun (2001) tutkimuksessa 3 039 käsiteltyä runkoa ja Nurmisen ym. (2006) tutkimuksessa 1 205 runkoa. Selkeästi kattavampia kelloaikatutkimuksia on suoritettu ennen metsäkoneiden tiedonkeruukapasiteetin kehitystä nykymuotoonsa, esimerkiksi Kuiton ym. (1994) tutkimuksessa aineisto oli 34 669 runkoa ja Kärhän ym. (2004) tutkimuksessa 14 079 runkoa. Tämän tutkimuksen aineiston koko mahdollistaa kaistalehakkuun käsittelylevyyksien kohtuullisen luotettavan vertailun, mutta tulosten perusteella kaistalehakkuun tuottavuustason yleistämisessä on huomioitava, että tulokset kuvaavat kaistalehakkuun ajanmenekkiä ja tuottavuustasoa vain kolmen kuljettajan ja kahden hakkuukohteen osalta.

Tutkimuskohteilla koealajärjestelyt onnistuttiin toteuttamaan hyvin, mikä mahdollisti kaistalehakkuuleveyksien vertailemisen kuljettajatasolla. Tutkimuksessa käytetyt koealat olivat kooltaan riittävän kokoisia aikatutkimuksen tarpeisiin ja mahdollistivat riittävän yhtäjaksoisen hakkuukonetyöskentelyn. Keskimäärin aikatutkimuskoealan pinta-ala oli 0,14 ha ja käsiteltyjen ainespuurunkojen määrä 74 kpl/koeala. Keskimääräinen aikatutkimuskoealan pinta-ala 0,14 ha oli samalla tasolla Nurmisen ym. (2006) tutkimuksen kanssa. Pienempiäkin koealoja on aikatutkimuksissa hyödynnetty. Esimerkiksi Laitilan ym. (2020) tutkimuksessa yksittäisen aikatutkimuskoealan pinta-ala oli keskimäärin 0,04 ha. Tutkimuskohteiden puustossa ei ollut koealojen välillä suurta vaihtelua, mikä myös osaltaan mahdollisti kaistalehakkuun käsittelylevyyksien vertailemiseen hyvän lähtökohdan. Käsittelylevyyksien vertailemisessa huomionarvoista oli se, että 30 metriä leveät kaistaleet käsiteltiin kahdelta 15 metriä leveältä käsittelykaistaleelta, joista ensimmäinen hakattiin muiden kaistalelevyyksien tapaan niin, että pystypuustoa oli molemmin puolin

kaistaletta, ja toinen 15 m kaistale niin, että seurattiin ensiksi avoimeksi hakatun kaistaleen reunaa. Nämä 15 metriä leveät kaistaleet luokiteltiin ensin erikseen, mutta niiden välillä ei havaittu eroja ajanmenekissä, joten 15 metriä leveitä kaistaleita tarkasteltiin lopulta koko aineiston perusteella yhtenä kokonaisuutena.

Empiiriseen maastossa suoritettavaan hakkuutyön aikatutkimukseen liittyy aina hyvää suunnittelusta ja koealajärjestelyistä huolimatta häiriötekijöitä, joita on vaikea täysin häivyttää tai vakioida. Tämän tutkimuksen osalta keskeisin häiriötekijä kaistalehakkuuleveyksien vertailemisessa muodostui tutkimusleimikoiden alikasvoksesta, minkä määrässä ja raivausajassa oli koealoittain vaihtelua. Raivausajan kuljettajakohtaisella vakioinnilla onnistuttiin kuitenkin häivyttämään vaihtelevan alikasvoksen vaikutusta. Muita mahdollisia häiriötekijöitä aikatutkimukseen aiheuttivat työskentelyajankohdan valo-olosuhteet sekä turvemaiden vaihteleva kantavuus. Kaikki kuljettajat työskentelivät sekä valoisaan että pimeään vuorokaudenaikaan. Kouvolassa iltavuorossa työskennellyt kuljettaja B hakkasi suurimman osan koealoista pimeään aikaan. Vaihtelevan valo-olosuhteen ei kuitenkaan todettu suuresti häiritsevän käsittelyleveyksien vertailua, koska kaikilla kuljettajilla kertyi eri käsittelykoealoja sekä valoisaan että pimeään vuorokaudenaikaan kohtuullisen tasaisesti. Lisäksi nykyaikaisten hakkuukoneiden valaistuskapasiteetti mahdollistaa lähes päivänvaloa vastaavat olosuhteet ja esimerkiksi suurimmalla osalla koealoista pimeään vuorokaudenaikaan työskennelleen kuljettajan B tuottavuus oli kuljettajista korkeimmalla tasolla. Tätä tutkimusta varten turvemaan kantavuutta ei mitattu koealoittain, joten tältä osin koealojen kantavuusvaihtelusta ei ole esittää mitattua tietoa. Turvemaiden vaihtelevien kantavuusolosuhteiden häiriövaikutuksen voidaan kuitenkin olettaa olevan varsin pieni käsittelyleveyksien vertailussa, koska koealaverkosto ja eri käsittelyleveydet oli ennakkotietojen perusteella sijoitettu tasaisesti ympäri tutkimuskohteita.

4.1.2 Käytetyt menetelmät

Kaistalehakkuun videointi hakkuukoneen ohjaamoon kiinnitetyllä videokameralla onnistui tässä tutkimuksessa hyvin ja videoiden kuvanlaatu oli hyvä, mikä helpotti jälkeensä suoritettavaa hakkuutyövaiheiden kellotusta. Työvaihekohtainen kelloaikatutkimus mahdollisti kaistalehakkuuleveyksien tarkastelun kohdentamisen yksittäisiin työvaiheisiin. Yksityiskohtaisella työvaihejaottelulla pystyttiin havaitsemaan työvaiheet, joiden osalta

esiintyi eroja kaistaleveyksien välillä. Työvaiheluokitus perustui soveltaen aikaisemmissa tutkimuksissa käytettyihin työvaiheluokituksiin, mikä mahdollistaa tässä tutkimuksessa laskettujen työvaiheaikojen vertailemisen muihin tutkimuksiin (esim. Nurminen ym. 2006, Laitila ym. 2020). Koko videoaineisto kelloitettiin yhden henkilön toimesta, joten tältä osin koko ajanmenekkiaineisto on yhtenäinen ja vertailukelpoisuus työvaiheajoissa käsittelyleveyksien ja kuljettajien välillä pystyttiin säilyttämään.

Kaistalehakuun tehoajanmenekki laskettiin summaamalla työvaihekohtaiset ajanmenekit yhteen, mikä on kelloaikatutkimuksissa yleinen toimintatapa (esim. Nurminen ym. 2006, Vahtila 2019). Rungoittain määritettyjen tehoajanmenekkien ja hakkuukoneen mitaamien runkokohtaisten tilavuustietojen perusteella mahdollistettiin riippuvuussuhteiden tarkastelu. Ajanmenekin ja tuottavuustason mallintaminen suhteessa rungon kokoon oli tämän tutkimuksen tapauksessa välttämätöntä, koska hyvistä koealajärjestelyistä huolimatta koealoilla rungon keskijäreydessä oli vaihtelua ja mallien avulla käsittelyleveyksien eroja pystyttiin tarkastelemaan samalla rungon koolla. Tutkimuksessa luotujen kuljettajakohtaisten regressiomallien selitysasteiden perusteella yksistään rungon koolla pystyttiin selittämään sekä hakkuutyön työvaiheiden ajanmenekkiä että tehotuntuottavuutta hyvin, kuten monissa aiemmissa tutkimuksissa on havaittu (esim. Kuitto ym. 1994, Rajamäki ym. 1996, Nurminen ym. 2006). Kuljettajittain määritetyissä regressiomalleissa selitysasteet (R^2) olivat kaadon ja tuonnin malleissa 0,059–0,354, prosessoinnin malleissa 0,457–0,649 ja tehotuntuottavuuden malleissa 0,815–0,927. Valemuuttujamallien hyödyntämisellä saatiin aineistosta kuljettajittain keskeiset käsittelyleveyksien erot esille. Valemuuttujatekniikan käyttö perustui pitkälti siihen, että aikaisemmissa tutkimuksissa tekniikan on todettu toimivan hakkuumenetelmien vertailemiseen (esim. Sirén & Tanttu 2001, Ovaskainen 2012, Vahtila 2019). Vertailevan aikatutkimuksen periaatteiden mukaisesti vertailtavia käsittelyleveyksiä tarkasteltiin tutkimuksessa useamman eri kuljettajan hakkuutyöskentelyn perusteella. Tässä tutkimuksessa kaikkien kolmen kuljettajan hyvin samansuuntaiset tulokset käsittelyleveyksien eroissa yksittäisten työvaiheiden runkokohtaisten ajanmenekkien (esim. siirtyminen ja hakkuulaitteen vienti) osalta vahvistavat tulosten johdonmukaisuutta. Koko aineistolle olisi voitu luoda valemuuttujamalli, jossa käsittelyleveyden lisäksi valemuuttujana on kuljettaja, mutta tämä olisi todennäköisesti pakottanut kuljettajien välisiä eroja likaa samaa tasoon, joten koko aineiston yhdistämistä yhteen valemuuttujamalliin ei tehty.

4.1.3 Käsittelyleveyden vaikutus kaistalehakkuun ajanmenekkiin

Työvaihekohtaisen kellotuksen tuloksista havaittiin, että siirtyminen ja hakkuulaitteen vienti olivat työvaiheet, jotka selkeimmin erosivat käsittelyleveyksien välillä. Siirtymisen runkokohtainen ajanmenekki oli luonnollisista syistä suurempi kapeammilla kaistaleilla, koska saman runkomäärän käsittelyä varten on kuljettava kapeammilla kaistaleilla pidempi matka. Keskimäärin kaistalehakkuussa siirtymisen ajanmenekit olivat 10 m kaistaleella 3,3 s/runko, 15 m kaistaleella 2,2 s/runko ja 20 m kaistaleella 2,1 s/runko. 10 m leveän kaistaleen runkokohtainen siirtymisaika erosi merkittävästi muista, ja oli jopa yli 50 % suurempi kuin 20 m leveällä kaistaleella. Laitilan ym. (2020) tutkimuksessa mäntyvaltaisen rämekehteen avohakkuussa siirtymisen keskimääräinen runkokohtainen ajanmenekki oli 2,1 s/runko aikatutkimuskoealojen runkoluvun ollessa 810–1238 r/ha. Laitilan ym. (2020) tutkimuksessa aikatutkimuskoealojen keskimääräinen leveys oli 16,8 m, joten tältä osin siirtymisen ajanmenekki on linjassa tämän tutkimuksen tulosten kanssa, vaikka tutkimuskoealojen runkoluvut eroavat toisistaan. Nurmisen ym. (2006) tutkimuksessa keskimääräinen siirtymisaika kangasmaiden avohakkuilla oli 4,6 s/runko (506 r/ha) käsittelyleveyden ollessa keskimäärin 13 m. Nurmisen ym. (2006) tutkimuksessa keskimääräinen siirtymisaika on selvästi suurempi kuin tässä tutkimuksessa lasketut kaistalehakkuun siirtymisajat, vaikka tutkimuksissa runkoluku on lähes samalla tasolla.

Hakkuulaitteen viennin ajanmenekki kaadettavalle rungolle oli systemaattisesti kaikilla kuljettajilla pienempi kapeammilla kaistaleilla, mikä on johdonmukaista, koska keskimääräinen runkojen etäisyys hakkuukoneesta on kapeammilla kaistaleilla pienempi kuin leveämmillä kaistaleilla. Keskimäärin hakkuulaitteen viennin ajanmenekit olivat 10 m kaistaleella 4,8 s/runko, 15 m kaistaleella 5,1 s/runko ja 20 m kaistaleella 5,4 s/runko. 15 m leveällä kaistaleella ajanmenekki oli 6 % ja 20 m leveällä kaistaleella 12 % suurempi kuin 10 m kaistaleella. Nurmisen ym. (2006) tutkimuksessa avohakkuulla hakkuulaitteen viennin runkokohtainen ajanmenekki oli 6,0 s/runko ja Laitilan ym. (2020) tutkimuksessa 6,3 s/runko. Nurmisen ym. (2006) ja Laitilan ym. (2020) tutkimuksissa hakkuulaitteen viennin ajanmenekit olivat keskimäärin 11–31 % suurempia kuin tässä tutkimuksessa. Erillisten hakkuutyön aikatutkimusten tulosten vertailemisessa täytyy tiedostaa, että tutkimustulokset eivät ole hakkuukohteiden ja olosuhteiden aiheuttamista eroista johtuen täysin vertailukelpoisia. Nurmisen ym. (2006) ja Laitilan ym. (2020) tuloksiin verraten

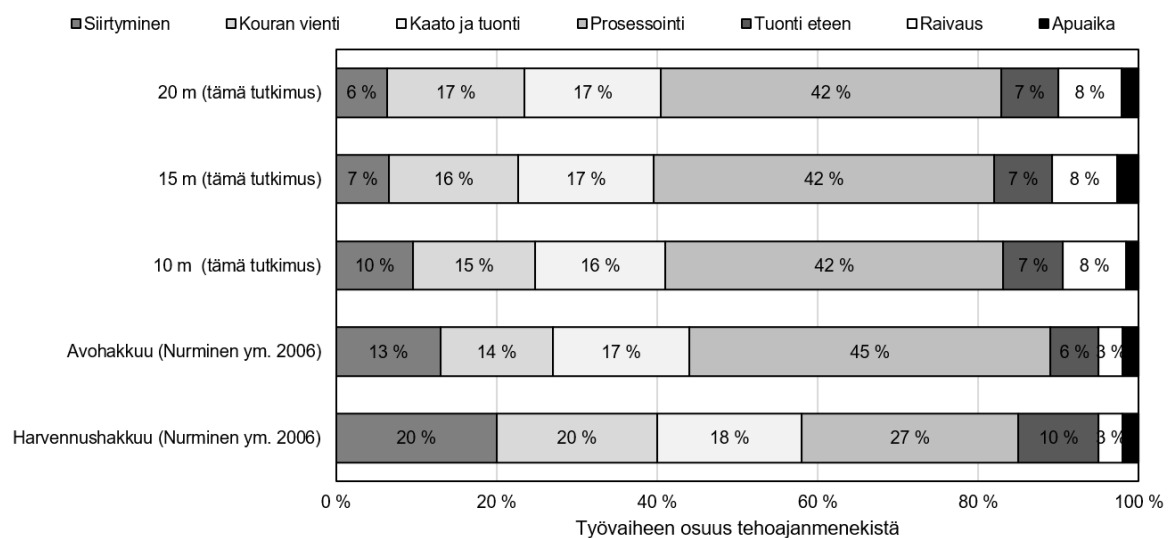
voidaan kuitenkin todeta, ettei kaistalehakkuussa hakkuulaitteen vientiaika ole ainakaan merkittävästi avohakkuuta suurempi.

Rungon koosta riippuvien prosessoinnin sekä kaato ja tuonti -työvaiheiden ajanmenneksissä ei valemuuttujamallien perusteella havaittu suuria eroja käsittelyleveyksien välillä, mutta kuljettajien välillä eroja oli havaittavissa. Kaato ja tuonti -työvaiheen ajanmenekki aineiston keskimääräisellä mäntyrungon koolla 0,365 m³ oli 15 m leveällä kaistaleella kuljettajalla A 5,5 s/runko, kuljettajalla B 5,1 s/runko ja kuljettajalla C 5,7 s/runko. Nurmisen ym. (2006) tutkimuksessa avohakkuulle luodun kaato ja tuonti -työvaiheen mallin perusteella rungon koolle 0,365 m³ laskettu ajanmenekki on 7,2 s/runko. Kaikki tämän tutkimuksen kuljettajat suorittivat kaato ja tuonti -työvaiheen keskimäärin nopeammin kuin kuljettajat Nurmisen ym. (2006) tutkimuksessa. Prosessoinnin osalta ajanmenekki aineiston keskirungolla 15 m leveällä kaistaleella oli kuljettajalla A 10,7 s/runko, kuljettajalla B 10,9 s/runko ja kuljettajalla C 20,6 s/runko. Sievissä työskennelleen kuljettajan C prosessoinnin ajanmenekki oli lähes kaksinkertainen Kouvolan kuljettajiin verrattuna. Erot hakkuulaitteissa (H414 vrt. H413) tai kohteiden puuston laadussa eivät yksistään selitä näin suurta eroa kuljettajien välillä. Kuljettajan C muita suuremman prosessoinnin ajanmenekin todettiin johtuvan pääasiassa työskentelytavasta. Kuljettaja C syötti prosessoinnin aikana käsiteltäviä runkoja huomattavasti enemmän edestakaisin hakkuulaitteessa. Kuljettajan C muita suurempi prosessoinnin ajanmenekki näkyy selvästi hakkuun tehoajanmenekissä sekä muita kuljettajia alhaisemmassa tuottavuustasossa. Nurmisen ym. (2006) tutkimuksessa mäntyrungoille luodun prosessointityövaiheen mallin perusteella rungon koolle 0,365 m³ laskettu ajanmenekki on 16 s/runko. Viidentoista vuoden aikana hakkuulaitteissa ja niiden syöttönopeuksissa tapahtuneen kehityksen ansiosta prosessoinnin voitiin jo ennakolta olettaa olevan tämän tutkimuksen kohteilla nopeampaa kuin Nurmisen ym. (2006) tutkimuksessa. Toisaalta kuljettajan C prosessointiaika oli Nurmisen ym. (2006) mallin antamaa tasoa suurempi.

Vaikka työvaiheista siirtymisen ja hakkuulaitteen viennin osalta havaittiin selkeitä jopa kymmenien prosenttien eroja käsittelyleveyksien välillä, ei niiden vaikutus hakkuutyön tehoajanmenekkiin ollut yhtä merkittävä. Kaistalehakkuun tehoajanmenekistä siirtymisen ja hakkuulaitteen viennin osuus oli tulosten perusteella vain 20–27 % käsittelyleveydestä ja kuljettajasta riippuen. Lisäksi kyseisten työvaiheiden vaikutukset hakkuutyön tehoajanmenekkiin olivat käsittelyleveyksillä vastakkaisia. Kapealla käsittelyleveydellä suurempi siirtymisen ajanmenekki kompensoitui pienemmällä hakkuulaitteen vientiajalla

ja päinvastoin. Käsittelyleveyksien tehoajanmenekin varsin pienistä eroista huolimatta tuloksista voidaan todeta, että 15 m leveällä käsittelykaistaleella hakkuutyön tehoajanmenekki oli kaikilla kuljettajilla muita leveyksiä pienempi.

Pääpiirteittäin kaistalehakkuun ajanmenekkirakenne vastasi tässä tutkimuksessa avohakkuulle tyypillistä rakennetta. Avohakkuulla prosessoinnin suhteellisen osuuden on todettu olevan suurempi kuin harvennushakkuulla ja vastaavasti siirtymisen ja hakkuulaitteen viennin osuuksien pienempi kuin harvennushakkuulla (esim. Ovaskainen ym. 2005, Nurmisen ym. 2006). Tässä tutkimuksessa kaikilla leveyksillä prosessoinnin osuus oli keskimäärin noin 42 % tehoajanmenekistä. Ovaskaisen ym. (2005) tutkimuksessa prosessoinnin osuus oli 53 %, Nurmisen ym. (2006) tutkimuksessa 45 % ja Laitilan ym. (2020) tutkimuksessa 43 % avohakkuun tehoajanmenekistä. Nurmisen ym. (2006) tutkimuksessa avohakkuulle määritetyt työvaiheiden suhteelliset osuudet olivat hyvin samalla tasolla tässä tutkimuksessa kaistalehakkuulle laskettujen osuuksien kanssa (kuva 23).



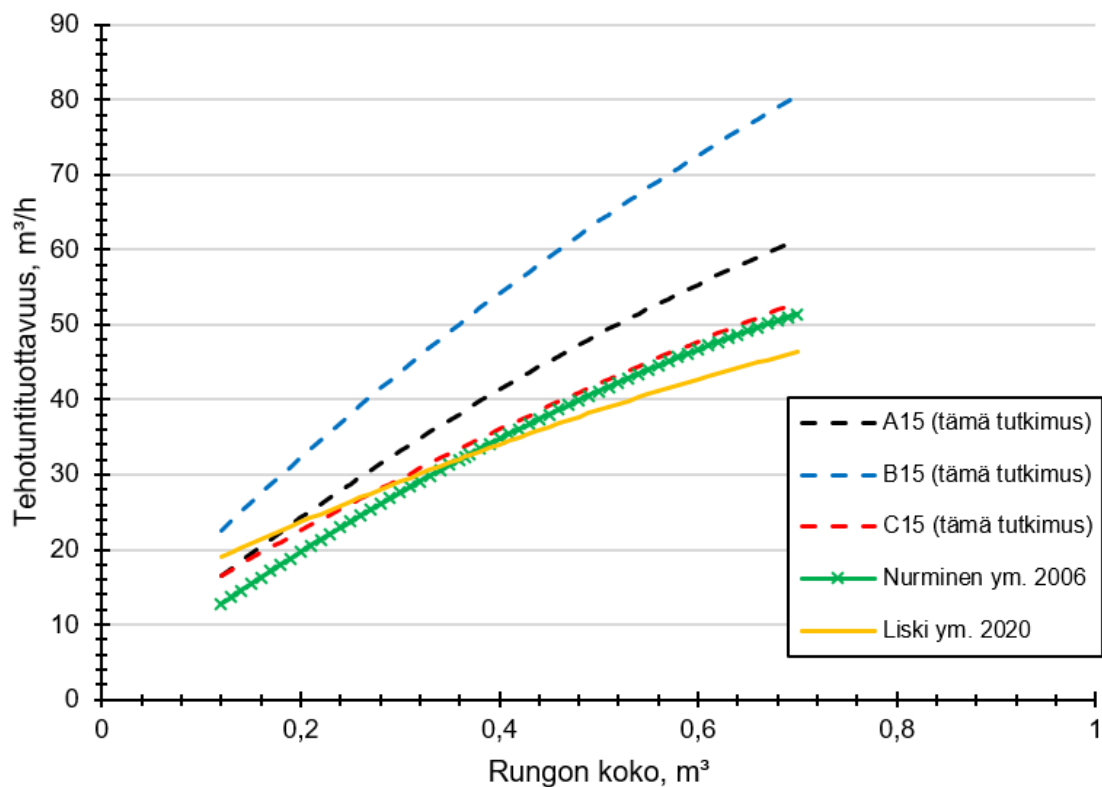
Kuva 23. Yksittäisten työvaiheiden osuudet tehoajanmenekistä kaistalehakkuussa tässä tutkimuksessa sekä vertailuksi esitetty Nurmisen ym. (2006) laskemat vastaavat osuudet avohakkuussa ja harvennushakkuussa.

4.1.4 Kaistalehakkuun tuottavuustaso

Aikatutkimusaineiston perusteella käsittelyleveyksien erojen todettiin olevan kuljettajatasolla pieniä ja samaa pätee kaistalehakkuun tuottavuustasoon, koska aineistosta lasketut tuottavuusluvut ovat suoraan riippuvaisia hakkuutyön ajanmenekistä. Tuottavuusmallilla aineiston keskirungolle 0,365 m³ lasketut tehotuntituottavuudet eri käsittelyleveyksillä olivat kuljettajalla A 36,8–37,4 m³/h, kuljettajalla B 49,5–50,6 m³/h ja kuljettajalla C 33,0–33,8 m³/h välillä. Keskimäärin 15 m leveällä kaistaleella tuottavuustaso oli korkeimmillaan. 10 m leveällä kaistaleella hakkuutyön tuottavuus oli keskimäärin 3 % ja 20 m leveällä kaistaleella 1 % pienempi kuin 15 m kaistaleella.

Kaistalehakkuuleveyksien välisten pienien erojen sijaan tutkimuksessa kaistalehakkuun tuottavuustasossa havaittiin suuria eroja kuljettajien välillä. Kaikki tämän tutkimuksen kuljettajat työskentelivät John Deeren 1170-mallin hakkuukoneella, joten tutkimuksessa käytettyjen koneiden osalta kuljettajien tuottavuustasot ovat vertailukelpoisia. Tulosten perusteella kuljettajan B tuottavuustaso oli noin 30 % suurempi kuin kuljettajalla A ja jopa 50 % suurempi kuin kuljettajalla C. Tämän tutkimuksen tulokset vahvistavat monissa aikaisemmissa tutkimuksissa havaittuja kuljettajien välisiä suuria tuottavuuseroja hakkuutyössä (esim. Rajamäki ym. 1996, Purfürst & Erler 2006, Ovaskainen 2009, Malinen ym. 2018).

Aikaisempaa tutkimustietoa kaistalehakkuun tuottavuustasosta ei ole, joten tässä tutkimuksessa lasketulle kaistalehakkuun tuottavuustasolle ei ole esittää vertailukohtaa muista tutkimuksista. Tämän tutkimuksen tulosten osalta kiinnostavaa on se, kuinka kaistalehakkuu suhteutuu avohakkuiden tuottavuustasoon, koska menetelmät ovat hakkuutyön toteutuksen kannalta hyvin lähellä toisiaan. Tässä tutkimuksessa ei tarkasteltu kuljettajien osalta muita hakkuumenetelmiä kuin kaistalehakkuuta, joten samojen kuljettajien tuottavuustulosten vertailu kaistalehakkuun ja muiden hakkuumenetelmien välillä ei ollut mahdollista. Aineiston perusteella laskettua kaistalehakkuun tuottavuustasoa voidaan kuitenkin varauksella verrata muissa tutkimuksissa saatuihin tuloksiin. Kuvassa 24 on esitetty tässä tutkimuksessa kuljettajittain määritetyt 15 metriä leveiden käsittelykaistaleiden tehotuntituottavuudet rungon koon funktiona sekä Nurmisen ym. (2006) ja Liskin ym. (2020) tutkimuksissa julkaistujen tuottavuusmallien kuvaajat.



Kuva 24. Tässä tutkimuksessa kaistalehakuulle kuljettajittain määritetyt tuottavuusmallit 15 metriä leveillä käsittelykaistaleilla verrattuna Nurmisen ym. (2006) ja Liskin ym. (2020) julkaisemiin hakkuutyön tehotuntituottavuusmalleihin. Kuvassa esitetyt Nurmisen ym. (2006) ja Liskin ym. (2020) mallit kuvaavat avohakkuun tuottavuustasoa mäntyvaltaisilla kohteilla.

Nurmisen ym. (2006) malli on luotu tämän tutkimuksen tapaan videoidun ja työvaiheittain kelloitetun hakkuuaineiston perusteella, joten malli on vertailukelpoinen tämän tutkimuksen tulosten kanssa. Liskin ym. (2020) mallissa aineistona on käytetty laajempaa 27 kuljettajan osalta Suomessa vuosina 2014–2017 hakkuukoneilta kerättyä seurantatutkimusaineistoa (sama aineisto kuin Jylhän ym. 2019 julkaisussa). Liskin ym. (2020) mallissa käytetty aineisto on kerätty erilaisella menettelyllä kuin tässä tutkimuksessa, joten malli ei ole täysin vertailukelpoinen tämän tutkimuksen kanssa, mutta antaa kuitenkin kohtalaisen vertailutason tämän tutkimuksen tuloksille. Kuvasta 24 on havaittavissa, että tämän tutkimuksen kaistalehakuuaineistosta määritetyt tehotuntituottavuudet ovat varsin korkealla tasolla. Etenkin kuljettajan B tuottavuustaso eroaa muista suuresti. Tämän tutkimuksen tuottavuustulosten tarkastelussa täytyy huomioida ns. hawthorne-ilmiö. Hawthorne-ilmiöksi kutsutaan työntutkimuksessa havaittua työntekijöiden hetkellistä tehokkuuden kasvua, kun heidän työtään seurataan (Magagnotti ym. 2012). Hawthorne-

ilmiö on usein todettu esiintyvän hakkuutyön kelloaikatutkimuksissa, kun kuljettajat tiedostavat tutkimustilanteen (esim. Kuitto ym. 1994, Strandgard ym. 2013, Eriksson & Lindroos 2014). Ilmiön voidaan olettaa vaikuttavan myös tässä tutkimuksessa kuljettajien tuottavuustasoon, vaikka taustatietoa kuljettajien pidemmän aikavälin keskimääräisestä tuottavuustasosta ei tässä tutkimuksessa tarkasteltukaan. Hawthorne-ilmiöstä huolimatta kaistalehakkuun tuottavuuden voidaan tulosten perusteella todeta olevan korkealla tasolla ja hyvin lähellä avohakkuun tuottavuutta.

Tässä tutkimuksessa saatujen kaistalehakkuun tuottavuustulosten perusteella pystyttäisiin selvittämään kaistalehakkuun kustannustasoa. Monissa tutkimuksissa kustannustason laskemiseksi hakkuutyön tehotuntituottavuuden lisäksi on laskettu käyttötuntituottavuus, mikä pitää sisällään alle 15 minuutin keskeytykset (esim. Kärhä ym. 2018, Kärhä ym. 2019). Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan laskettu ja vertailtu hakkuutyön kustannuksia eri kaistalehakkuuleveyksillä, joten tarvetta käyttötuntituottavuuden laskennalle ei ollut.

4.2 Kaistalehakkuun työtekniikka

Tässä tutkimuksessa kuljettajille ei haluttu enakkoon ohjeistaa mitään yksittäistä työskentelytapaa kaistalehakkuun suorittamiseen, koska haluttiin selvittää kuinka kuljettajat työskentelevät itse parhaaksi kokemallaan tavalla leveydeltään erikokoisilla kaistaleilla. Ovaskainen (2012) on kuvannut avohakkuulle kolme tyypillistä työmallia, jotka ovat sektoriyömalli sekä sivullepäin ja eteenpäin kaato -työmallit. Ovaskaisen (2012) kuvaamat työmallit eroavat toisistaan keskeisimmin kaatosuuntausten ja puutavaralajien kasauksen osalta. Tämän tutkimuksen tuloksista voitiin todeta, että kaikki kuljettajat hyödynsivät etenkin 10 m leveällä kaistaleella Ovaskaisen (2012) kuvaamaa eteenpäin kaato -työmallia, sillä poikkeuksella, että suhteessa kaatosijaintiin runkoja prosessoitiin sekä samalle että eri puolelle konetta hakkuu-uran havuttamiseksi. Eteenpäin kaato -työmallissa rungot kaadetaan nimensä mukaisesti eteenpäin hakkuukoneen kulkusuuntaan nähden. Ovaskaisen (2012) mukaan eteenpäin kaato -työmallia käytetään yleensä silloin, kun tarvitsee tehdä normaalia enemmän rungon laaduttamista tai työskennellään lähellä raja- tai sähkölinjaa. Tässä tutkimuksessa eteenpäin kaato valikoitui kuljettajien käyttöön, koska pysyyn jäävien vieruskaistaleiden puustoa oli varottava. Ovaskaisen (2012) mukaan eteenpäin kaato -työmallia käytetään avohakkuilla yleensä siten, että käsittelyleveys on mo-

lemmin puolin hakkuukonetta 60–80 % hakkuukoneen puomin ulottumasta. Tässä tutkimuksessa käytettyjen koneiden puomin maksimiulottuma oli 11,3 metriä, joten 10 ja 15 metriä leveiden kaistaleiden osalta pystyttiin työskentelemään molemmin puolin konetta vähintään eteenpäin kaato -työmallille sopivalla 60–80 % ulottumalla. 20 metriä leveän kaistaleen osalta runkoja jouduttiin kaatamaan hakkuukoneen puomin ulottuman ääri rajoilla, yli edellä esitetyn 80 %:n. 20 metriä leveällä kaistaleella kauimpien runkojen kaatoa ei aina pystytty suuntaamaan eteenpäin, mistä syystä kaatoja suoritettiin osin sivullepäin ja etuviistoon.

Kuljettajat hyödynsivät 10 metriä leveän kaistaleen lisäksi myös muilla leveyksillä pääpiirteittäin eteenpäin kaadon periaatteita niin, että puutavarakasoja tehtiin kummallekin puolelle hakkuukonetta. 15 ja 20 metriä leveillä kaistaleilla kuitenkin kohtisuoraan eteenpäin suunnattuja kaatoja enemmän korostui kaatojen suuntaus kaistaleen reunoista pois päin niin, että vasemmalta puolelta konetta kaatoja suunnattiin etuoikealle ja oikealta etuvasemmalle puustovaurioiden välttämiseksi. Tässä tutkimuksessa 30 metriä leveä kaistale käsiteltiin kahdelta 15 metriä leveältä käsittelykaistaleelta ja tästä syystä 15 metriä leveän käsittelykaistaleen hakkuuympäristö erosi 10 ja 20 metriä leveiden kaistaleiden hakkuusta siinä, että ensiksi hakattavalla 15 metriä leveällä kaistaleella puut oli mahdollista kaataa seuraavaksi hakattavan vielä pystyssä olevan kaistaleen puolelle puustovaurioista välittämättä. Ensimmäisen 15 metriä leveän puoliskon hakkuun jälkeen seuraavaksi hakattavan 15 metriä leveän käsittelykaistaleen rungot pystyttiin puolestaan kaadettaessa suuntaamaan avoimeksi hakatulle kaistaleelle. Tämä ei kuitenkaan aineistossa näkynyt 15 metriä leveän kaistaleen osalta muita suurempana kohtisuoraan sivullepäin tapahtuvana kaatojen suuntauksena. Tässä tutkimuksessa tarkasteltu 15 metriä leveä käsittelyleveys on todennäköisesti lähimpänä hakkuukoneenkuljettajien hyödyntämää tavanomaista käsittelyleveyttä avohakkuilla. Laitilan ym. (2020) tutkimuksessa kuljettaja hyödynsi mäntyvaltaisen rämekohteen avohakkuussa 16,8 m käsittelyleveyttä. Ovaskaisen (2005) mukaan avohakkuulla puita ei juurikaan kaadeta yli 8 metrin etäisyydeltä hakkuukoneesta.

Tässä tutkimuksessa työtekniikan vaikutusta ei tarkemmin käsitelty kaistalehakkuun ajanmenekin ja tuottavuustason tarkastelun yhteydessä. Aiemmissa tutkimuksissa työtekniikoilla ja työmalleilla on todettu olevan vaikutusta hakkuutyön ajanmenekkiin ja tuot-

tavuustasoon (esim. Nurmi 1994, Ovaskainen ym. 2011, Ovaskainen 2012). Tässä tutkimuksessa kuljettajien käyttämä työtekniikka oli käytännön syistä jokseenkin erilainen eri käsittelyleveyksillä. Kuljettajat kuitenkin hyödynsivät pääpiiteittäin eteenpäin kaatoa ja kummallekin puolelle kasausta kaikilla käsittelyleveyksillä, joten tutkimuksessa lasketujen ajanmenekkien ja tuottavuustasojen vertailu oli mahdollista ilman työtekniikan tarkempaa sisällyttämistä tarkasteluun.

4.3 Puustovauriot kaistalehakkuussa

Tässä tutkimuksessa mitattujen puustovauriokoealojen yhteispinta-ala 4,17 ha on varsin kattava otanta kuvaamaan puustovaurioiden määrää kaistalehakkuussa. Puustovauriokoealojen sijoittelu jokaisen hakkuukaistaleen reunalinjoja pitkin kulkien mahdollisti koealojen joutuisan mittaamisen. Lisäksi mittausmenetelmällä mahdollistettiin lähes kaikkien kaistalehakkuun seurauksena syntyneiden puustovaurioiden paikantaminen, sillä oletuksella, ettei yli kuuden metrin päässä kaistaleen reunasta puustovaurioita juurikaan esiintynyt. Puustovauriokoealojen perusteella laskettua vaurioprosenttia ei kuitenkaan voi suoraan tulkita koko alueen vaurioprosentiksi, koska koealat keskitettiin hakkuukaistaleiden reunoihin ja pystykaistaleiden keskiosat ovat otannassa aliedustettuina. Tutkimusleimikoiden yhteispinta-ala oli noin 17,4 ha, josta hakkuukaistaleita oli 6,74 ha ja puustovauriokoealoja 4,17 ha, joten noin 37 % kohteiden pinta-alasta jäi hakkuukaistaleiden ja puustovauriokoealojen ulkopuolelle. Toisin sanoen tämän tutkimuksen puustovauriotulokset kuvaavat puustovaurioiden määrää kuuden metrin etäisyydellä kaistalehakkuun reunasta ja todellisten koko kaistalehakkuukohteen puustovaurioprosenttien voidaan olettaa olevan vielä pienempiä kuin tässä tutkimuksessa esitetyt vaurioprosentit. Puustovaurioiden määrittämisessä käytettiin Suomen metsäkeskuksen maastotarkastusohjeen mukaista puustovaurion määritelmää, joten tulokset ovat tältä osin vertailukelpoisia metsäkeskuksen valtakunnallisiin mittaustuloksiin ja muihin tutkimuksiin, joissa on käytetty samoja määritelmiä puustovaurioille.

Tulosten perusteella puustovaurioiden määrän todettiin olevan vähäinen kaistalehakkuussa. Koko aineistossa vaurioituneita puita oli vain 2,6 % hakkuukaistaleiden vieruspui-
sta. Puustovauriokoealoilta mitatun runkoluvun perusteella tämä on noin 12 vaurioitunutta runkoa hehtaarilla. Suomen metsäkeskuksen käyttämässä harvennushakkuiden

korjuujäljen luokittelussa harvennushakkuun korjuujälki on puustovaurioiden osalta suosituksen mukainen silloin kun vaurioita on enintään 5 % jäävästä puustosta. Suomen metsäkeskus suoritti vuoden 2019 aikana korjuujäljen tarkastuksia yhteensä 145 harvennuseimikon osalta ja tulosten perusteella puustovaurioiden määrän todettiin olevan keskimäärin 3,5 % jäävästä puustosta (Korjuujälkitarkastukset 2019). Jatkuvan kasvatuksen hakkuumenetelmistä poimintahakkuuta on kritisoitu niissä aiheutuvasta kohtuuttoman suuresta puustovaurioiden määrästä. Sirénin ym. (2015) tutkimuksessa puustovaurioiden määrän todettiin olevan keskimäärin 13,8 % kolmella kuusivaltaisella kohteella suoritetun poimintahakkuun jälkeen. Hämäläisen (2014) tutkimuksessa poimintahakkuun jälkeen rinnankorkeusläpimitaltaan yli 7 cm puista vaurioituneiksi todettiin 7,7 %. Hämäläisen (2014) ja Sirénin ym. (2015) tutkimuksissa jatkuvan kasvatuksen kannalta tärkeän alikasvospuuston osalta vaurioiden osuuden todettiin olevan vielä edellä esitettyjä ainespuukokoisiin runkoihin syntyneitä vaurioita suurempi. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella kaistalehakkuumenetelmällä voidaan mahdollistaa poimintahakkuuta vähäisempi puustovaurioiden määrä.

Koko aineistosta laskettujen puustovaurioprosenttien perusteella eniten vaurioita (3,1 %) todettiin kapeimmalla 10 m leveällä kaistaleella ja vähiten (1,7 %) 30 m leveäksi hakatulla kaistaleella. Tulosten perusteella käsittelykaistaleen leveyden pienentyessä puustovaurioiden määrä suurenee, mikä vaikuttaa johdonmukaiselta, koska kapeammalla kaistaleella pystyyn jäävän kaistaleen vieruspuut ovat keskimäärin lähempänä hakkuukonetta ja kaistaleelta kaadettavia puita. Toisaalta puustovaurioprosentit eri kaistaleleveyksillä eroavat vain vähän toisistaan ja tässä tutkimuksessa puustovaurioiden osuuksia eri käsittelyleveyksillä tarkastellaan vain aineistosta laskettujen keskiarvojen perusteella ilman tarkempaa tilastollista merkitsevyystasojen tarkastelua. Sirénin (1998) mukaan kuljettajalla on keskeinen vaikutus puustovaurioiden määrään. Myös tässä tutkimuksessa keskiarvotarkastelun perusteella kuljettajien välillä havaittiin eroja puustovaurioiden määrässä. Kuljettajalla A puustovaurioiden määrä oli kaikilla kaistaleleveyksillä keskimäärin kuljettajia B ja C pienempi.

Tässä tutkimuksessa kunkin puustovaurion aiheuttajaa ei pystytty täydellä varmuudella määrittämään, koska vauriot inventoitiin hakkuun ja metsäkuljetuksen jälkeen. Vaurioiden laadun ja sijaintien perusteella pystyttiin kuitenkin toteamaan, että suurin osa vaurioista syntyi hakkuutyön seurauksena kaadettavan rungon osuessa pystyyn jääväällä kais-

taleella sijaitsevaan puuhun. Sirénin (1998) mukaan harvennushakkuissa puustovaurioiden yleisin aiheuttaja on kaadettava puu, mutta myös hakkuukoneen sekä kuormatraktorin kosketukset aiheuttavat vaurioita erityisesti ajourien läheisyydessä. Tämän tutkimuksen kohteilla lähes kaikki puustovauriot ilmenivät mäntyrungoissa, joiden keskiläpimitta oli 23,6 cm. Joukossa oli vakavia vaurioita, mutta osa vaurioista oli myös laadultaan sellaisia, jotka täyttivät Suomen metsäkeskuksen vauriomääritelmän, mutta eivät todennäköisesti aiheuta järeissä männyissä suuria kasvutappioita tai lahoriskiä. Toisaalta pienetkin vauriot voivat aiheuttaa puun kylkeen koron, joko alentaa rungon jalostusarvoa. Sirénin (1998) mukaan harvennushakkuilla suurin osa vakavista puustovaurioista syntyy kuormatraktorin kolhiessa ajouran reunuspuita. Tämän tutkimuksen kaistalehakkuukohteilla metsäkuljetuksesta aiheutuneet puustovauriot jäivät todella vähäisiksi, koska kuormatraktorilla pystyttiin ajamaan hakkuukaistaleella riittävän etäisyyden päässä puustokaistaleen reunasta.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kaistalehakkuumenetelmä on tässä tutkimuksessa lasketun hakkuutyön tuottavuustason ja vähäisen puustovaurioriskin perusteella erittäin varteenotettava menetelmä mäntyvaltaisten rämekohteiden hakkuumenetelmäksi. Korkea hakkuutyön tuottavuustaso ja riittävä puustopoistuma antavat kaistalehakkuussa hyvät lähtökohdat kannattavalle puunkorjuun toteutukselle. Hakkuukaistaleen leveydellä ei todettu olevan kuin muutamien prosenttien vaikutus hakkuutyön tuottavuustasoon, joten kaistalehakkuuleveyksien käyttöä voidaan soveltaa kunkin hakkuukohteen ominaisuuksien mukaan, huolehtimatta suurista tuottavuustasojen vaihteluista hakkuutyössä. Tutkimuksessa mukana olleet kuljettajat pitivät kaistalehakkuuta helposti omaksuttavana hakkuumenetelmänä ja kokivat sen toteutuksen mielekkääksi.

Tässä tutkimuksessa kaistalehakkuuta tarkasteltiin puustoltaan tasarakenteisten rämekohteiden ensimmäisessä kaistalehakkuussa. Tutkimuksessa mukana olleet kuljettajat hyödynsivät soveltaen eteenpäin kaadon periaatteita eri kaistaleveyksillä, koska pystyyn jääviä puustokaistaleita oli varottava puustovaurioiden välttämiseksi. Toisen kaistalehakkuukerran ajankohta riippuu avoimeksi hakattujen kaistaleiden taimettumisesta ja kasvusta, joista on toistaiseksi vain vähän tietoa. Myöhempien kaistalehakkuukertojen toteutus ja hakkuutyössä käytettävät menetelmät ovat varmasti hyvin lähellä tässä tutkimuksessa havaittua ensimmäisen kaistalehakkuukerran toteutusta, mutta erojakin varmasti ilmenee. Tässä tutkimuksessa saatujen kokemusten perusteella kohteelle kannattaa avata hakkuukaistaleet ojalinjojen suuntaisesti, koska ojalinjojen seuraaminen hakkuutyössä mahdollistaa suorien ja selkeästi hahmotettavien kaistaleiden muodostamisen. Kohtalaisen laaja yhtenäinen ojitusalue on kaistalehakkuun toteutukselle soveltuvien kohde, koska laaja kohde mahdollistaa selkeän kaistaleiden jaksottamisen ja riittävän poistuman yksittäiseltä kaistalehakkuukerralta (kuva 25). Puunkorjuun toteutuksen kannalta kaistalehakkuuta voidaan pitää pienaukkohakkuuta selkeämpänä menetelmänä, koska kaistalehakkuussa käsittelyalueet ovat suoraviivaisia ja selkeämmin erotettavissa. Tämä näkökulma korostuu etenkin useamman hakkuukerran jälkeen, koska kaistalehakkuukohteella kaistaleet ovat lähtökohtaisesti erotettavissa toisistaan, kun puolestaan pienaukkohakkuilla useiden hakkuukertojen seurauksena muodostuneet pienialaiset puustoryhmät voivat olla vaikeasti hahmotettavissa ja vaikeuttavat puunkorjuun suunnittelua sekä toteutusta.



Kuva 25. Riittävän laaja yhtenäinen ojitusalue mahdollistaa kaistalehakkuun jaksottamisen kahteen tai useampaan hakkuuajankohtaan. Kuva tämän tutkimuksen kaistalehakkuukohteelta Kouvolasta. Kuvassa taustalla laajempi avohakkuualue.

Hakkuutoimenpiteiden seurauksena syntyvä puustovaurioiden määrä jää monissa yhteyksissä jatkuvan kasvatuksen hakkuista käsiteltäessä liian vähälle huomiolle. Nykyaikaisella konekalustolla puustovaurioiden määrän on todettu olevan poimintahakkuissa huomattavan suuri, jopa kymmeniä prosentteja jäävästä puustosta (esim. Hämäläinen 2014, Siren ym. 2015). Useamman poimintahakkuukerran jälkeen vaurioiden määrä kaiken lisäksi kumuloituu puustossa, koska suurin osa vaurioista kohdistuu pienimpiin kasvamaan jätettäviin runkoihin. Poimintahakkuissa suositustenmukaisen korjuujäljen saavuttaminen voi lähtökohtaisesti olla monelle kuljettajalle varsin haastava tavoite ottaen huomioon kuljettajille asetetut korkeat tavoitteet hakkuukoneen tuottavalle käytölle. Tämän tutkimuksen perusteella turvamaiden jatkuvan kasvatuksen keinovalikoimaan kuuluvassa kaistalehakkuussa puustovaurioiden määrä pystytään pitämään todella vähäisenä hakkuutyön tuottavuustasosta tinkimättä. Tässä tutkimuksessa kaistalehakkuuta tarkasteltiin vain

mäntyvaltaisilla rämeikohteilla, mutta myös kuusivaltaisilla korpikohteilla kaistalehakkuumenetelmän hyödyntäminen vaikuttaa lupaavalta vaihtoehdolta.

Tavaralajimenetelmään perustuvassa puunkorjuussa hakkuutyön lisäksi metsäkuljetus on puunkorjuun kokonaistuottavuuden kannalta keskeinen tekijä, jota ei tässä tutkimuksessa tarkasteltu. Tulevaisuudessa myös metsäkuljetuksen toteutusta turvemaiden kaistalehakkuissa olisi hyvä tutkia puunkorjuun kokonaistuottavuuden hahmottamiseksi. Käsittelylevyydellä on ainakin vaikutusta hakkuutyön kasausjälkeen ja kasojen kokoon, mikä osaltaan vaikuttaa kuormatraktorin työpistekertymään. Tässä tutkimuksessa työpistetasolla tapahtuvan tarkastelun lisäksi kaistalehakkuuta kannattaisi tulevaisuudessa tarkastella työvuorotasolla, samalla periaatteella kuin Eliasson ym. (2020) vertailivat pienaukko- ja avohakkuiden tuottavuustasoa ja kustannuksia Ruotsissa. Työvuorotasolla tapahtuvaan tarkasteluun saadaan mukaan kaistaleiden suunnitteluun ja muuhun kaistalehakkuun aiheuttamaan ylimääräiseen työhön kuluva aika, mikä jää työpistetasolla tapahtuvassa tehoajanmenekin tarkastelussa huomioimatta.

Kokonaisuudessaan tässä tutkimuksessa onnistuttiin luomaan hakkuutyön toteutuksen osalta Suomessa ennestään tutkimattomalle kaistalehakkuumenetelmälle hyvä tietopohja, jota voidaan hyödyntää tulevaisuudessa kaistalehakkuita käsittelevän muun tutkimustiedon lisääntyessä ja menetelmän käytön yleistyessä. Kaistalehakkuumenetelmässä käytettävällä kaistaleen leveydellä ei ole hakkuutyön kannalta suurta merkitystä, joten soveltuvimman kaistaleleveyden osalta keskeiset tietotarpeet liittyvät tällä hetkellä turpeen vedenpinnan tason ja taimettumisen selvittämiseen eri leveyksillä.

LÄHTEET

- Ala-Ilomäki, J., Högnäs, T., Lamminen, S., & Sirén, M. 2011. Equipping a conventional wheeled forwarder for peatland operations. *International Journal of Forest Engineering* 22(1): 7-13.
- Brunberg, T. 1997. Basic data for productivity norms for single-grip harvesters in thinning. Redogörelse-Skogforsk (Sweden). no. 1997: 8.
- Dubé, S., Plamondon, A. P., & Rothwell, R. L. 1995. Watering up after clear-cutting on forested wetlands of the St. Lawrence lowland. *Water Resources Research* 31(7): 1741-1750.
- Eliasson, L., Grönlund, Ö, Lundström, H., & Sonesson, J. 2020. Harvester and forwarder productivity and net revenues in patch cutting. *International Journal of Forest Engineering*, 1-8.
- Eliasson, L., & Wästerlund, I. 2007. Effects of slash reinforcement of strip roads on rutting and soil compaction on a moist fine-grained soil. *Forest Ecology and Management* 252(1-3): 118-123.
- Eriksson, M., & Lindroos, O. 2014. Productivity of harvesters and forwarders in CTL operations in northern Sweden based on large follow-up datasets. *International Journal of Forest Engineering* 25(3): 179-200.
- Finér, L., Mattsson, T., Joensuu, S., Koivusalo, H., Laurén, A., Makkonen, T., Nieminen, M., Tattari, S., Ahti, E., & Kortelainen, P. 2010. Metsäisten valuma-alueiden vesistökuormituksen laskenta.
- Hiltunen, O., & Palander, T. 2020. Puuntuotannon ja puunhankinnan kehittämismahdollisuudet Etelä-Lapin ojitetuilla soilla.
- Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. & Troxler, 527 T.G. (toim.) 2014. Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. IPCC, Switzerland. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/index.html> [Viitattu 10.12.2020].
- Hämäläinen, J. 2014. Poimintahakkuun nykykäytännöt: työohjeistus, ajanmenekki ja korjuujälki.
- Hökkä, H., Kaunisto, S., Korhonen, K. T., Päivänen, J., Reinikainen, A., & Tomppo, E. 2002. Suomen suometsät 1951–1994.
- Hökkä, H., Salminen, H., Ahtikoski, A., Kojola, S., Launiainen, S., & Lehtonen, M. 2016. Long-term impact of ditch network maintenance on timber production, profitability and environmental loads at regional level in Finland: a simulation study. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 90(2): 234-246.
- Ilmatieteen laitos. 2020. Säähavainnot [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus> [Viitattu 19.12.2020].

- Jylhä, P., Jounela, P., Koistinen, M., & Korpunen, H. 2019. Koneellinen hakkuu: Seurantatutkimus. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 11/2019. Luonnonvarakeskus.
- Kariniemi, A., & Vartiamaäki, T. 2010. Hakkuukoneen tietojärjestelmä tutkimustiedon lähteenä. Metsätehon raportti 212.
- Keltikangas, M. 1971. Sarkaleveyden vaikutus ojitusinvestoinnin taloudelliseen tulokseen.
- Kojola, S., Penttilä, T., & Laiho, R. 2004. Impacts of different thinning regimes on the yield of uneven-structured Scots pine stands on drained peatland.
- Korhonen, K. T., Ihalainen, A., Ahola, A., Heikkinen, J., Henttonen, H. M., Hotanen, J., Nevalainen, S., Pitkänen, J., Strandström, M., & Viiri, H. 2017. Suomen metsät 2009–2013 ja niiden kehitys 1921–2013.
- Korjuujälkitarkastukset 2019. Suomen metsäkeskus. https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/tiedote-liite-korjuujalki-tarkastukset_0.pdf [Viitattu 4.1.2021].
- Kuitto, J. 1994. Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsakuljetus [Mechanized cutting and forest haulage]. Metsätehon raportti 410.
- Kärhä, K., Anttonen, T., Poikela, A., Palander, T., Laurén, A., Peltola, H., & Nuutinen, Y. 2018. Evaluation of salvage logging productivity and costs in windthrown Norway spruce-dominated forests. *Forests* 9(5): 280.
- Kärhä, K., Keskinen, S., Kallio, T., Liikkanen, R., & Lindroos, J. 2006. Ennakkoraivaus osana ensiharvennuspuiden korjuuta. Metsätehon raportti 187.
- Kärhä, K., Räsänen, M., & Palander, T. 2019. The profitability of cross-cutting practices in butt-rotten *Picea abies* final-felling stands. *Forests* 10(10): 874.
- Kärhä, K., Rönkkö, E., & Gumse, S. 2004. Productivity and cutting costs of thinning harvesters. *International Journal of Forest Engineering* 15(2): 43-56.
- Laamanen, V. 2014. Poimintahakkuukohteiden puuston rakenne, korjuutekniset olosuhteet, korjuukustannukset ja korjuujälki.
- Labelle, E. R., & Jaeger, D. 2012. Quantifying the use of brush mats in reducing forwarder peak loads and surface contact pressures. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 33(2): 249-274.
- Laine J., Vasander H., Hotanen J.-P., Nousiainen H., Saarinen M., Penttilä T. 2012. Suotyypit ja turvekankaat – opas kasvupaikkojen tunnistamiseen. Metsäkustannus, Helsinki. 160 s.
- Laitila, J., Väättäinen, K., & Asikainen, A. 2013. Comparison of two harvesting methods for complete tree removal on tree stands on drained peatlands. *Suo-Mires and Peat* 64(2-3): 77-95.
- Laitila, J., Väättäinen, K., & Kilpeläinen, H. 2020. Integrated harvesting of industrial roundwood and energy wood from clearcutting of a Scots pine-dominated peatland forest. *International Journal of Forest Engineering* 31(1): 19-28.

Leivo, J., Partanen, J., Hytönen, H., Haataja, L., Sorjonen, J. 2020. Maastotarkastusohje. Suomen metsäkeskus 2020.

Lindroos, O. 2010. Scrutinizing the theory of comparative time studies with operator as a block effect. *International Journal of Forest Engineering* 21(1): 20-30.

Liski, E., Jounela, P., Korpunen, H., Sosa, A., Lindroos, O., & Jylhä, P. 2020. Modeling the productivity of mechanized CTL harvesting with statistical machine learning methods. *International Journal of Forest Engineering* 31(3): 253-262.

Lähde, E. 1971. Anaerobisten olosuhteiden ja aerobisuusrajan esiintymisestä erilaisilla luonnontilaisilla turvemailla ja merkityksestä suotyypin kuvaajana.

Magagnotti N., Spinelli R., Acuna M., Bigot M., Guerra S., Hartsough B., Kanzian C., Karha K., Lindroos O., Roux S. 2012. Good practice guidelines for biomass production studies. Sesto. Fiorentino (Italy): CNR IVALSÀ; 50 s.

Malinen, J., Taskinen, J., & Tolppa, T. 2018. Productivity of cut-to-length harvesting by operators' age and experience. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 39(1): 14-22.

Mattsson, T., Ahtiainen, M., Kenttämies, K., & Haapanen, M. 2006. Avohakkuun ja ojituksen pitkäaikaisvaikutukset valuma-alueen ravinne- ja kiintoainehuuhtoumiin. *Metsätalouden Vesistökuormitus. MESUVE-hankkeen loppuraportti. Suomen Ympäristö* 816: 73-81.

Minkkinen, K., Laine, J., & Hökkä, H. 2001. Tree stand development and carbon sequestration in drained peatland stands in Finland-a simulation study.

Minkkinen, K., Ojanen, P., Penttilä, T., Aurela, M., Laurila, T., Tuovinen, J., & Lohila, A. 2018. Persistent carbon sink at a boreal drained bog forest. *Biogeosciences*.

Mäkelä, M. 1986. Metsäkoneiden kustannuslaskenta. Metsäteho.

Nieminen, M., Hökkä, H., Laiho, R., Juutinen, A., Ahtikoski, A., Pearson, M., Kojola, S., Sarkkola, S., Launiainen, S., & Valkonen, S. 2018. Could continuous cover forestry be an economically and environmentally feasible management option on drained boreal peatlands? *Forest Ecology and Management* 424: 78-84.

Nieminen, M., Sallantausta, T., Ukonmaanaho, L., Nieminen, T. M., & Sarkkola, S. 2017. Nitrogen and phosphorus concentrations in discharge from drained peatland forests are increasing. *Science of the Total Environment* 609: 974-981.

Nugent, C., Kanali, C., Owende, P. M., Nieuwenhuis, M., & Ward, S. 2003. Characteristic site disturbance due to harvesting and extraction machinery traffic on sensitive forest sites with peat soils. *Forest Ecology and Management* 180(1-3): 85-98.

Nurmi, J. 1994. Työtavan vaikutus hakkuukoneen tuotokseen ja hakkuutähteen kasautumiseen. *Folia Forestalia–Metsätieteen Aikakauskirja* 2(1994): 113-122.

Nurminen, T., Korpunen, H. & Uusitalo, J. 2006. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system. *Silva Fennica* 40(2): 335–363.

- Nuutinen, Y. 2013. Possibilities to use automatic and manual timing in time studies on harvester operations. *Dissertationes Forestales* 156.
- Ojanen, P., Minkkinen, K., Alm, J., & Penttilä, T. 2010. Soil–atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. *Forest Ecology and Management* 260(3): 411-421.
- Ojanen, P., Minkkinen, K., Alm, J., & Penttilä, T. 2018. Corrigendum to “Soil–atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands”. [*For. Ecol. Manage.* 260 (2010) 411–421]. *Forest Ecology and Management* 412: 95-96.
- Ojanen, P., Minkkinen, K., & Penttilä, T. 2013. The current greenhouse gas impact of forestry-drained boreal peatlands. *Forest Ecology and Management* 289: 201-208.
- Ovaskainen, H. 2005. Comparison of harvester work in forest and simulator environments. *Silva Fennica* 39(1): 89-101.
- Ovaskainen, H. 2009. Timber harvester operators’ working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity. *Dissertationes Forestales*, 79.
- Ovaskainen, H. 2012. Työmallit koneellisessa puunkorjuussa. *Metsätehon raportti* 22.
- Ovaskainen, H., Palander, T., Tikkanen, L., Hirvonen, H., & Ronkainen, P. 2011. Productivity of different working techniques in thinning and clear cutting in a harvester simulator. *Baltic Forestry* 17(2): 288-298.
- Palander, T., Nuutinen, Y., Kariniemi, A., & Väätäinen, K. 2013. Automatic time study method for recording work phase times of timber harvesting. *Forest Science* 59(4): 472-483.
- Purfürst, F. T., & Erler, J. 2011. The human influence on productivity in harvester operations. *International Journal of Forest Engineering* 22(2): 15-22.
- Purfürst, T., & Erler, J. 2006. The precision of productivity models for the harvester—do we forget the human factor. *Esitelmä konferenssissa Precision Forestry in Plantations, Semi-Natural and Natural Forests. Proceedings of the International Precision Forestry Symposium. Stellenbosch University, South Africa*, 5-10.
- Rajamäki, J., Kariniemi, A., & Oijala, T. 1996. Koneellisen harvennushakkuun tuottavuus. *Metsätehon raportti* 8.
- Saarinen, M. 2013. Männyn kylvö ja luontainen taimettuminen vanhoilla ojitusalueilla: Turvemaiden uudistamisen erityispiirteitä.
- Saarinen, M., Valkonen, S., Sarkkola, S., Nieminen, M., Penttilä, T., & Laiho, R. 2020. Jatkuvaiteisen metsänkasvatuksen mahdollisuudet ojitetuilla turvemailla.
- Sarkkola, S., Hökkä, H., Jalkanen, R., Koivusalo, H., & Nieminen, M. 2013. Kunnostusojitustarpeen arviointi tarkentuu—puuston määrä tärkeä ojituskriteeri.
- Sarkkola, S., Hökkä, H., & Penttilä, T. 2004. Natural development of stand structure in peatland Scots pine following drainage: results based on long-term monitoring of permanent sample plots.

- Schneider, H., & Päivinen, R. 2020. Suometzien kokonaisanalyysi, loppuraportti. Tapion raportteja nro 38. Saatavissa: <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/03/Suometzien-kokonaisanalyysi-loppuraportti-PDF.pdf> [Viitattu 10.12.2020].
- Sirén, M. 1998. Hakkuukonetyö, sen korjuujälki ja puustovaurioiden ennustaminen. Väitöskirja. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 649. 179 s.
- Sirén, M., Hyvönen, J., & Surakka, H. 2015. Tree damage in mechanized uneven-aged selection cuttings. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 36(1): 33-42.
- Sirén, M. & Tantt, V. 2001. Pienet hakkuukoneet ja korjuri rämemännikön talvikorjuussa. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2001: 599–614.
- Strandgard, M., Walsh, D., & Acuna, M. 2013. Estimating harvester productivity in *Pinus radiata* plantations using StanForD stem files. *Scandinavian Journal of Forest Research* 28(1): 73-80.
- Strandström, M. 2016. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2015. Metsätehon tulostalvosarja 4a/2016.
- Suadicani, K., & Fjeld, D. 2001. Single-tree and group selection in montane Norway spruce stands: factors influencing operational efficiency. *Scandinavian Journal of Forest Research* 16(1): 79-87.
- Uusitalo, J., & Ala-Ilomäki, J. 2013. The significance of above-ground biomass, moisture content and mechanical properties of peat layer on the bearing capacity of ditched pine bogs. *Silva Fennica* 47:1-18.
- Uusitalo, J. 2010. Introduction to Forest Operations and Technology. JVP Forest Systems Oy. 287 s.
- Uusitalo, J., Salomäki, M., & Ala-Ilomäki, J. 2015. The effect of wider logging trails on rut formations in the harvesting of peatland forests. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 36(1): 125-130.
- Vahtila, M. 2019. Poistettavien puiden etukäteisvalinnan vaikutus hakkuun tuottavuuteen ja laatuun koneellisessa harvennushakkuussa.
- Valkonen, S. 2017. Metsän jatkuvasta kasvatuksesta.
- Valtakunnan metsien inventointi (VMI12). 2020. [Verkkodokumentti]. Luonnonvarakeskus. Saatavissa: <https://metsainfo.luke.fi/fi/cms/metsavarat/vmi-tulokset> [Viitattu 3.1.2021].
- Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. & Väisänen, P. (toim.) 2019. Metsänhoidon suositukset. Tapion julkaisuja.